



Étude de la prédiction de chocs véhicule-piéton

Christophe Wakim

► To cite this version:

Christophe Wakim. Étude de la prédiction de chocs véhicule-piéton. Mathématiques [math]. Université Paris Sud - Paris XI, 2005. Français. NNT: . tel-00081906

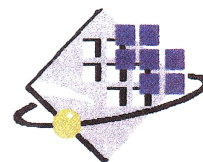
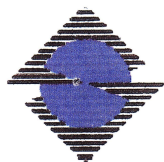
HAL Id: tel-00081906

<https://theses.hal.science/tel-00081906>

Submitted on 26 Jun 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° D'ORDRE :

**UNIVERSITÉ PARIS XI
UFR SCIENTIFIQUE D'ORSAY**

THÈSE

présentée pour obtenir

**le GRADE de DOCTEUR en SCIENCES
de l'UNIVERSITÉ PARIS XI ORSAY**

par

Christophe Farès WAKIM

Sujet :

Étude de la prédiction de chocs véhicule-piéton

Soutenue le 01/12/2005 devant la commission d'examen

M. Sébastien CORNOU
M. Pascal DRAZETIC
M. Claude LAURGEAU
M. Jacques OKSMAN
M. Roger REYNAUD

Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Président du Jury

Table des matières

Remerciements	xi
Publications dans le cadre de cette thèse	xii
Acronymes utilisés	xiii
Notations et conventions	xiv
Introduction	1
1 Contexte	1
1.1 Enjeux	1
1.2 Réglementation sur la sécurité des piétons	1
1.3 Dispositifs de sécurité primaire et secondaire	2
1.4 Détection de piétons	2
2 Protection des piétons	2
2.1 Stratégies	2
2.2 Système de protection de piéton	3
2.3 Détection de choc et prédiction de choc	3
3 Détection de piétons pour la prédiction de collisions véhicule-piéton	6
3.1 Enchaînement des décisions	6
3.2 Contraintes industrielles	6
4 Organisation de cette thèse	7
4.1 Approche utilisée	7
4.2 Structure	8
1 Accidents véhicule-piéton	9
1.1 Introduction	9
1.1.1 Motivations	9

1.1.2	Enjeux	9
1.1.3	Définitions	10
1.1.4	Piétons et autres usagers vulnérables de la route	11
1.1.5	Organisation du chapitre	11
1.2	L'accidentologie	12
1.2.1	Définition	12
1.2.2	Déroulement d'un accident de la circulation	12
1.2.3	Informations brutes sur les accidents	13
1.2.4	Analyse et exploitation des données recueillies sur les accidents	14
1.3	État de l'art sur les accidents véhicule-piéton	15
1.3.1	Étude épidémiologique de l'INRETS DERA	15
1.3.2	Études épidémiologiques aux États-Unis	16
1.3.3	PBCAT : un outil informatique pour la classification	16
1.3.4	EDA et reconstructions du CEESAR Amiens	17
1.3.5	Scénarios-types de l'INRETS Département MA	17
1.4	Base de scénarios-types d'accidents véhicule-piéton	17
1.4.1	Méthodologie	17
1.4.2	Regroupement des scénarios-types	19
1.4.3	Analyse des résultats	20
1.4.4	Comparaison avec d'autres travaux	25
1.5	Bilan de l'accidentologie piéton	26
2	Modélisation du comportement piéton	29
2.1	Introduction	29
2.1.1	Prédiction de trajectoires de piétons	29
2.1.2	Simulation de trajectoires de piétons	30
2.1.3	Organisation du chapitre	30
2.2	Synthèse des travaux sur les piétons	31
2.2.1	Classification des travaux de recherche sur les piétons	31
2.2.2	Observation du comportement des piétons	35
2.2.3	Modèles de comportement de piétons	37
2.2.4	Modèle « de Nicolao » : marche aléatoire intégrée	41
2.3	Modèle probabiliste de trajectoires de piétons à quatre états	45
2.3.1	Informations <i>a priori</i> sur le comportement des piétons	45
2.3.2	Modèle proposé	46

2.3.3	Propriétés du vecteur vitesse	48
2.3.4	Choix des paramètres	49
2.4	Résultats	52
2.4.1	Évaluation des trajectoires et comparaisons	52
2.4.2	Limites du modèle proposé et améliorations potentielles	53
2.4.3	Applications	54
2.5	Bilan de la modélisation du comportement des piétons	56
3	Estimation de la probabilité de choc véhicule-piéton	57
3.1	Introduction	57
3.2	Présentation de l'existant	58
3.2.1	Détection de collision entre objets	58
3.2.2	Trafic aérien et résolution de conflits	58
3.2.3	Anti-collision dans l'automobile	60
3.2.4	Prédiction de chocs véhicule-piéton	63
3.3	Définitions et spécifications de la prédiction de chocs	64
3.3.1	Géométrie et cinématique	64
3.3.2	Choc avant véhicule-piéton	68
3.4	Algorithmes de prédiction de chocs	73
3.4.1	Prédiction « nominale »	73
3.4.2	Prédiction probabiliste	74
3.4.3	Utilisation du déterminisme par morceaux du modèle piéton	82
3.5	Exemples et résultats	83
3.5.1	Exemples de prédiction de choc véhicule-piéton	83
3.5.2	Évaluation de l'efficacité des méthodes de prédiction	86
3.6	Bilan	87
4	Faisabilité d'un système de prédiction de chocs véhicule-piéton	89
4.1	Objectifs de ce chapitre	89
4.2	Systèmes embarqués de prédiction de chocs véhicule-piéton	90
4.2.1	Modes de prédiction	90
4.2.2	Évaluation et validation de la prédiction de chocs en mode embarqué	92
4.3	Influence des incertitudes sur les observations	96
4.3.1	Modèle de système de détection de piétons	96
4.3.2	Modèles d'incertitudes sur les estimations	98

4.4	Résultats	99
4.4.1	Mode embarqué avec détection et estimation parfaites	99
4.4.2	Caractéristiques physiques du système de détection	100
4.4.3	Performances de la prédiction en présence d'incertitudes sur l'estimation	100
4.5	Bilan	105
Conclusion - Perspectives		107
6	Bilan	107
7	Discussion	108
8	Perspectives	109
Annexes		111
A Définitions classiques employées dans cette thèse		111
A.1	Théorie du signal et de la décision	111
A.2	Qualité d'une décision	112
B Accidents véhicules - deux roues non motorisés		113
B.1	Introduction	113
B.2	Épidémiologie	113
B.3	Typologie des accidents	115
B.4	Conclusion	116
C Accidents de rollers		117
C.1	Épidémiologie	117
C.2	Législation	117
C.3	Dynamique	117
C.4	Conclusion	117
D Accidents véhicule-piéton : mise à jour		119
D.1	Scénarios-types de l'INRETS Département MA en 2003	119
D.2	NHTSA : remise à jour de la classification	121
E Les onze scénarios-types d'accidents véhicule-piéton		123
F Modèle piéton à quatre états vu comme un PDMP		133
F.1	Données du modèle	133

F.2	Espace d'état du processus	134
F.3	Évolution de l'état du piéton	134
G	Jeux de paramètres pour le modèle piéton	137
G.1	Propriétés à priori des jeux de paramètres	137
G.2	Jeu de paramètres n° 1	137
G.3	Jeu de paramètres n° 2	138
G.4	Jeu de paramètres n° 3	139
G.5	Jeu de paramètres n° 4	139
G.6	Jeu de paramètres n° 5	140
G.7	Jeu de paramètres n° 6	141
G.8	Jeu de paramètres n° 7	141
G.9	Principaux résultats sur les trajectoires	142
H	Estimation d'une loi de probabilité à partir de sa densité empirique	145
H.1	Limites de l'histogramme	145
H.2	Utilisation de noyaux	146
I	Prédiction de positions de piétons	147
I.1	Prédiction à une seconde	147
I.2	Prédiction à trois secondes	148
J	Outliers ou mesures aberrantes	151
	Références bibliographiques	153

Table des figures

1	Système adaptatif complet de protection des piétons	4
2	Déclenchement progressif des contre-mesures en fonction de l'imminence de l'impact	4
3	Protection des piétons : décisions pour les sécurités secondaire et primaire . . .	5
4	Plan de la thèse.	8
1.1	Niveaux d'information sur les accidents	14
1.2	Algorithme de classification d'un PVM en scénario-type.	19
1.3	Arbre des scénarios-types d'accidents véhicule-piéton	19
1.4	Scénario type 1 : piéton masqué traversant hors passage « protégé ».	21
1.5	Partition des accidents tests aux États-Unis	26
2.1	Évolution du risque de choc en fonction du temps pour trois situations	30
2.2	Classification des modèles de piétons	31
2.3	Les trois échelles d'observation des piétons en groupe	33
2.4	Relations entre les trois approches de modélisation	33
2.5	Décomposition du déplacement d'un piéton selon l'approche comportementale	34
2.6	Niveaux d'analyse du comportement des piétons.	35
2.7	Trajectoires de piétons traversant une route, hors et sur passage piéton. . . .	36
2.8	Décomposition du mouvement du piéton.	41
2.9	Influence du pas temporel sur les trajectoires obtenues par le modèle « de Nicolao »	43
2.10	Sensibilité au pas de temps des modèles « de Nicolao » et « de Nicolao modifié »	44
2.11	Exemple de trajectoires aberrantes générées par le modèle « de Nicolao modifié »	45
2.12	Diagramme de changement d'état.	46
2.13	Algorithme de génération de trajectoires de piétons.	47
2.14	Modèle à quatre états : continuité de la vitesse avec le temps	48
2.15	Les huit principaux changements de direction.	50
2.16	Probabilité de changement de direction	50
2.17	Diagramme des temps de transition.	51
2.18	Comparaison de trajectoires générées par les trois modèles	52
2.19	Changement de voie.	54
3.1	Détection et résolution des conflits entre aéronefs	59
3.2	Véhicules évoluant en sens opposés.	60
3.3	Choc fronto-arrière.	60

3.4	Courbe COS (Caractéristiques Opérationnelles du Système)	61
3.5	Mesure de performance de l'alerte.	61
3.6	Algorithme de prédiction de collisions	63
3.7	Système de prévention des collisions	64
3.8	Repères véhicule et face avant	65
3.9	Cercle englobant le piéton	66
3.10	Orientation du piéton.	66
3.11	Géométrie et cinématique du modèle « roues arrières »	67
3.12	Formalisation du choc avant véhicule-piéton, plan horizontal.	68
3.13	Géométrie d'un choc frontal véhicule-piéton	69
3.14	Prise en compte de la gravité variable lors de contacts véhicule-piéton	69
3.15	Modélisation simplifiée d'un choc véhicule-piéton.	70
3.16	Définition du temps (ou instant) d'impact.	70
3.17	Classification d'une situation véhicule-piéton.	71
3.18	Découpage du plan en zones de risque.	72
3.19	Algorithme de prédiction de chocs « nominale ».	73
3.20	Prédiction de choc véhicule-piéton par Monte Carlo.	75
3.21	Algorithme probabiliste de prédiction de chocs (appelé « classique »).	75
3.22	Algorithme probabiliste de prédiction de chocs (variante « classique 2 »).	77
3.23	Méthode de « splitting » et « roulette russe ».	78
3.24	Algorithme de « splitting » et « roulette russe » appliqué à la prédiction de chocs véhicule-piéton	79
3.25	Monte Carlo intelligent : importance fonction de la distance.	79
3.26	Monte Carlo intelligent : importance fonction du temps avant dépassement.	80
3.27	Monte Carlo intelligent : importance fonction de la position angulaire.	80
3.28	Monte Carlo intelligent : importance fonction de la direction.	81
3.29	Monte Carlo intelligent : utilisation de la prédiction déterministe.	81
3.30	Découpage en régions d'importance avec les notions de début et de fin de traversée.	82
3.31	PDMP : nombre d'opérations réduit	83
3.32	$P(choc)$ (a) et tti moyen (b) en fonction de la position du piéton	84
3.33	$P(choc)$ (a) et tti moyen (b) en fonction de la position longitudinale du piéton	85
3.34	Comparaison des algorithmes Monte Carlo : « classique » et « classique 2 ».	86
3.35	Comparaison des performances de quatre algorithmes d'estimation des proba- bilités.	87
3.36	Intérêt de l'utilisation de la propriété PDMP.	88
4.1	Trajectoire relative d'un piéton dans le repère véhicule : points de passage in- termédiaires.	91
4.2	Schéma fonctionnel de l'outil de simulation / évaluation.	93
4.3	Traitement et classification des résultats de prédiction.	96
4.4	Champ de détection : géométrie.	97
4.5	Courbes COR : prédiction de choc en présence d'incertitudes gaussiennes sur la mesure de la position relative.	101
4.6	Performances en présence de bruit gaussien sur les positions.	102
4.7	Performances en présence de bruit gaussien sur les vitesses.	102

4.8	Performances en présence de bruit gaussien sur les incertitudes sur la position et la vitesse.	103
4.9	Performances en présence d'une proportion importante de mesures aberrantes sur la position.	104
4.10	Performances en présence d'une proportion importante de mesures aberrantes sur la vitesse.	104
E.1	Scénario-type 1 : piéton masqué traversant hors passage « protégé ».	124
E.2	Scénario-type 2 : piéton non masqué traversant hors passage piéton.	125
E.3	Scénario-type 3 : piéton traversant sur passage piéton.	126
E.4	Scénario-type 4 : Piéton longeant la voie ou marchant sur la chaussée.	127
E.5	Scénario-type 8 : perte de contrôle du véhicule, piéton sur trajectoire.	128
E.6	Scénario-type 10 : piéton traversant sur autoroute.	129
E.7	Scénario-type 11 : piéton allongé ou immobile sur la chaussée.	130
E.8	Scénarios-types 5 et 6	131
E.9	Scénarios-types 7 et 9	131
G.1	Comparaison entre les jeux de paramètres du modèle de piétons.	137
G.2	Piéton initialement immobile, répartition de l'abscisse de sa position après quelques secondes.	143
G.3	Piéton qui marche initialement, répartition de l'abscisse de sa position après quelques secondes.	143
G.4	Piéton qui trotte initialement, répartition de l'abscisse de sa position après quelques secondes.	144
I.1	Positions de piétons après une seconde	147
I.2	Ddp du rayon polaire de la position du piéton après une seconde	148
I.3	Répartition des positions d'un piéton après trois secondes.	148
I.4	Position d'un piéton après trois secondes	149
I.5	Densité de probabilité de la position angulaire d'un piéton après trois secondes.	150
J.1	Loi de Cauchy et loi normale.	152

Liste des tableaux

1	Comparaison entre les stratégies de protection.	3
2	Contraintes associées aux moyens de protection.	6
1.1	Victimes des accidents de la route en 2003	9
1.2	Données extraites des PVM.	18
1.3	Résumé des scénarios-types d'accidents véhicule-piéton.	22
1.4	Accidents véhicule-piéton : modes et occurrences.	23
1.5	Alcool, stupéfiants chez le piéton et chez le conducteur impliqués (PVM).	24
1.6	Bilan de la classification pour les trois sources d'accidents en France.	25
2.1	Typologie comportementale de la marche des piétons	34
2.2	Données caractéristiques pour une traversée de passage piéton à feux	37
2.3	Vitesse des piétons en fonction de leur activité	37
2.4	Vitesses moyennes respectives des hommes et des femmes	37
2.5	Taux de trajectoires réalistes	44
2.6	Gammes de vitesses des états du piéton	49
2.7	Probabilité de changement de direction principale.	50
2.8	Durée minimale de maintien dans un état.	51
2.9	Temps de transition.	51
2.10	Probabilité de changement d'état.	52
2.11	Taux de trajectoires réalistes	53
2.12	Couverture des comportements typiques de piétons	53
3.1	Dimensions caractéristiques des piétons	65
3.2	Dimensions caractéristiques d'une Renault Vel Satis.	66
3.3	Comparaison des modèles de trajectoires de véhicules.	68
3.4	Description d'une particule et de son issue	74
4.1	État actuel d'une situation véhicule-piéton.	92
4.2	Issue d'une situation véhicule-piéton.	92
4.3	Description de la base de test	94
4.4	Comparaison prédiction/référence.	95
4.5	Comparaison prédiction/référence : influence de la tolérance sur \widehat{tti}	96
4.6	Performances de la prédiction de chocs véhicule-piéton	99
4.7	Performances de la prédiction de chocs véhicule-piéton	100

A.1	Détection de présence de piéton : les quatre situations.	112
B.1	Pourcentage de tués chez les enfants	113
B.2	Répartition des victimes de la route aux États-Unis d'Amérique	114
B.3	Nombre de victimes par mode de déplacement en France, en 1994.	114
B.4	Victimes de la route à Paris, en 2001	114
B.5	Pays Bas, données officielles annuelles.	115
D.1	Conséquences d'une mauvaise visibilité	119
D.2	Autres conditions	120
D.3	Piétons sur la chaussée ou sortant d'un véhicule	120
D.4	Absence d'interférence <i>a priori</i> entre le piéton et le véhicule	120
D.5	Contexte particulier	120
D.6	Accidents de piétons aux États-Unis	121

Remerciements

Ce travail de recherche s'est déroulé dans le cadre d'une thèse CIFRE. J'ai eu l'occasion de fréquenter deux environnements complémentaires : Renault du côté industriel et Supélec pour la partie académique.

Je remercie Didier Wautier, Chef du Groupe Détection de l'Environnement et Aides à la Conduite à la Direction de la Recherche de Renault, ainsi que Jacques Oksman, Chef du Département Traitement du Signal et Systèmes Électroniques de Supélec, pour leur confiance.

Messieurs Claude Laurgeau et Pascal Drazetic ont bien voulu lire ce manuscrit et étudier ma thèse avec grande attention. Je les en remercie grandement pour cela, ainsi que pour leurs remarques très constructives. Merci aussi à Monsieur Roger Reynaud qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

J'ai beaucoup appris aussi bien sur le plan scientifique et technique que sur le plan humain et relationnel pendant ces trois années de thèse. Je suis très reconnaissant à Élisabeth Lahalle et Jacques Oksman d'avoir assuré le co-encadrement « académique ». Je tiens à saluer ceux qui ont participé à l'encadrement de mes travaux chez Renault : merci à Yves Page, du LAB, Stéphane Capperon, Philippe Flegel et Sébastien Cornou pour le temps qu'ils m'ont consacré.

D'une manière plus générale, je tiens à remercier tous ceux que j'ai fréquentés chez Renault et à Supélec. Merci à Fabienne Suraud, pour son efficacité et sa bonne humeur.

Je me dois également de saluer les doctorants avec qui j'ai eu le plaisir et l'honneur de collaborer : Yotam Abramson et Julien Bect.

Un grand merci à ceux qui ont bien voulu lire mon manuscrit et me faire part de leurs commentaires : Laurette Guyonvarc'h, Jean-François Camart, Javier Ibanez-Guzman, Jean-Yves Le Coz, Vincent Ayma, Omar Sedjai, Pierre Bauchère, Gilles Castres Saint Martin.

Enfin, je remercie mes amis, ma famille et Nicole pour leur soutien.

Publications dans le cadre de cette thèse

Articles scientifiques

C. Wakim, S. Capperon, and J. Oksman, “Design of pedestrian detection systems for the prediction of car-to-pedestrian accidents,” in *7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, October 3-6 2004, pp. 696–701.

C. Wakim, S. Capperon, and J. Oksman, “A Markovian model of pedestrian behavior,” in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, October 10–13 2004, pp. 4028–4033.

C. Wakim, “Pedestrian detection for the prediction of car-to-pedestrian accidents,” *Revue Ingénieurs de l’Automobile*, no. 773, pp. 78–82, novembre-décembre 2004.

Brevets

C. Wakim et S. Capperon, « Procédé et dispositif de prévision de chocs d’un véhicule », Brevet déposé à l’INPI (FR 03-15548), 30 décembre 2003, étendu à l’Office Européen des Brevets (EP1550586). Ce brevet propose un modèle de comportement de piétons à quatre états discrets. Le dispositif consiste à réaliser la prédiction de chocs véhicule-piéton en utilisant des simulations de Monte Carlo.

C. Wakim et S. Capperon, « Système et procédé de commande automatique de positionnement d’un élément de détection de l’environnement, embarqué à bord d’un véhicule automobile », Brevet déposé à l’INPI (FR 04-07437), en juillet 2004, étendu à l’Office Européen des Brevets (n°). Ce brevet permet d’adapter le champ de détection d’un dispositif de détection de l’environnement en fonction du contexte.

C. Wakim, « Procédé et système embarqué de prédiction de choc entre un véhicule et un piéton », Brevet déposé à l’INPI (FR 05-06504), 27 juin 2005. Ce brevet présente une prise en compte des paramètres du choc prédits pour optimiser le déclenchement des systèmes de contre-mesure.

C. Wakim, « Procédé et système anti-collision adaptatif pour véhicule automobile », Brevet déposé à l’INPI (FR 05-06505), 27 juin 2005. Ce brevet présente un dispositif permettant de protéger le piéton en combinant un système de prédiction de choc véhicule-piéton à un système de surveillance des activités du conducteur.

C. Wakim, « Procédé et système de prédiction de choc entre un véhicule et un piéton » Brevet déposé à l’INPI (FR 05-08631), 19 août 2005. Ce brevet présente un dispositif de prédiction de choc véhicule piéton aux performances temps réel, grâce à l’utilisation d’algorithmes de réduction de variance.

Acronymes utilisés

ACC : Autonomous Cruise Control

AASHTO : American Association of State Highway and Transportation Officials

CEESAR : Centre Européen d'Études de Sécurité et d'Analyse des Risques

ddp : densité de probabilité

EDA : Étude Détaillée d'Accident

Euro NCAP : European New Car Assessment Programme

FHWA : Federal Highway Administration

INPI : Institut National de la Propriété Intellectuelle

INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

ITS : Intelligent Transportation Systems

IV : Intelligent Vehicle

LAB : Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique

MC : Monte Carlo

NHTSA : National Highway Traffic Safety Administration

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économiques

OEB : Office européen des brevets

OFDT : Observatoire Français des Drogues et des Toxicomanies

ONSER : Organisme National de Sécurité Routière

PDMP : Piecewise Deterministic Markov Process

pds : Poids

PVC : Procès Verbal d'accident Corporel

PVM : Procès Verbal d'accident Mortel

SAM : consortium Stupéfiants et Accidents Mortels

SETRA : Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes

tti : Time To Impact, temps avant impact

UNECE : United Nations Economic Commission for Europe

vi : Vitesse d'Impact

V-P : Véhicule-Piéton

zip : Zone d'Impact

Notations et conventions

Les notations ci-dessous seront employées tout au long de cette thèse :

- une variable scalaire sera notée en italique : x .
- une constante, une fonction mathématique ou un opérateur seront notés en caractères droits : π , \cos .
- un vecteur sera noté en caractères gras minuscules : \mathbf{u} .
- une matrice sera notée en caractères gras majuscules : \mathbf{A} .
- un point de l'espace ou du plan sera noté en lettres majuscules : P .

Pour alléger la notation, le repère n'est précisé que lorsqu'il y a des risques de confusion.

- La position du piéton dans le repère \mathcal{R} est notée $\mathbf{P}^{piet})_{\mathcal{R}} = (P_x^{piet}, P_y^{piet})_{\mathcal{R}}$.
- Sa vitesse est notée $\mathbf{V}^{piet})_{\mathcal{R}} = (V_x^{piet}, V_y^{piet})_{\mathcal{R}}$.
- La position du véhicule dans le repère \mathcal{R} est notée $\mathbf{P}^{veh})_{\mathcal{R}} = (P_x^{veh}, P_y^{veh})_{\mathcal{R}}$.
- Sa vitesse est notée $\mathbf{V}^{veh})_{\mathcal{R}} = (V_x^{veh}, V_y^{veh})_{\mathcal{R}}$.

Introduction

1 Contexte

1.1 Enjeux

Tous les ans, dans le monde, plus de 1,2 millions de personnes meurent sur la route [1]. Selon les régions, la part des piétons blessés et tués oscille entre 10 et 50% des victimes de l'insécurité routière.

Les recommandations du « rapport mondial sur la prévention des traumatismes dus aux accidents de la route », paru en 2004, résument les principales mesures de sécurité routière [1]. Cette thèse participe aux efforts des constructeurs de véhicules pour « l'amélioration de la sécurité des véhicules moyennant une recherche-développement constante » [1].

Pour le constructeur automobile Renault, la « sécurité pour tous » est un engagement, un argument commercial et une réalité. Les cinq étoiles obtenues par les véhicules récents aux crash-tests Euro NCAP¹ illustrent cette maîtrise.

Le but de cette thèse est de contribuer à la réalisation d'un système de protection de piétons. Cette thèse se concentre sur les systèmes et dispositifs de protection des piétons installés sur les véhicules. Le travail de prévention visant les conducteurs et/ou les piétons, la modification des infrastructures routières, ou encore le recours à des systèmes de conduite complètement automatiques ne seront pas abordés.

1.2 Réglementation sur la sécurité des piétons

Pendant des années, le piéton n'a bénéficié d'aucune mesure visant à améliorer ses chances de survie en cas d'impact avec un véhicule à moteur. En 2003, la Commission Européenne a adopté une directive en faveur d'une sécurité accrue des piétons [3]. Entrée en application en 2005, cette règle sur le « choc piéton » a déjà eu des conséquences sur la conception de la face avant des nouveaux modèles de véhicules. Les pare-buffles sont dorénavant interdits. De plus, l'organisme Euro NCAP réalise des crashs-tests « piéton » depuis 2002. Enfin, une nouvelle norme sur la sécurité des piétons, plus stricte, est en préparation et verra le jour autour de 2010. Pour la respecter, les constructeurs pourraient équiper leurs véhicules de systèmes de protection active.

¹Euro NCAP : New Car Assessment Programme, organisme indépendant qui évalue et note la sécurité des véhicules automobiles [2].

1.3 Dispositifs de sécurité primaire et secondaire

Les progrès en sécurité automobile ont permis, ces cinquante dernières années, de réduire la gravité et le nombre d'accidents de la route. C'est surtout la protection des occupants des véhicules à quatre roues qui a progressé.

La diffusion en série de systèmes de sécurité comme les ceintures de sécurité, les coussins gonflables (airbags) et, d'une manière générale, la conception intelligente orientée vers la sécurité « secondaire » ont rendu les véhicules récents beaucoup plus sûrs pour leurs occupants. Les dispositifs de sécurité « primaire » sont conçus pour agir avant la collision, pour éviter le choc ou en limiter la violence. Pour Renault, l'efficacité réelle des dispositifs de sécurité, éprouvée sur le terrain, prime sur les annonces médiatiques.

1.4 Détection de piétons

La détection de piétons à distance et l'estimation de certaines de leurs caractéristiques physiques ou géométriques est réalisée au sein d'un système dit de « détection de l'environnement du véhicule ». Un tel système est composé d'un ou plusieurs capteurs : caméras mono ou stéréo vision, dans les longueurs d'ondes visibles ou infra rouges, radars, lidars, télémètres à balayage... et d'un module de traitement du signal adapté.

Depuis 2004, le constructeur automobile japonais Honda propose, en option, sur son modèle haut de gamme « Legend », le premier système commercial de détection de piétons (stéréo vision avec des caméras dans le domaine infrarouge), qui alerte le conducteur lorsque des piétons sont détectés, la nuit [4]. L'information fournie par un système de détection de piétons seul n'est pas directement exploitable par le conducteur. En ville un tel système se déclencherait très souvent, le conducteur finirait par s'en lasser et le désactiver. Traiter et filtrer les informations issues de la détection permet de réaliser une prestation automobile sûre, utile et acceptable.

Renault considère que la détection à distance de l'environnement et des obstacles ne s'inscrit pas dans son cœur de métier. Les travaux sur la détection de piétons ne sont pas directement menés en interne, mais à travers des collaborations avec des partenaires (fournisseurs industriels ou laboratoires de recherche). Renault souhaite néanmoins maîtriser les aspects fonctionnels de la détection, afin d'être en mesure de sélectionner la meilleure solution technique et de valider son intérêt.

2 Protection des piétons

2.1 Stratégies

Une partie de la recherche automobile étudie la protection des piétons. Les grandes classes de moyens de protection du piéton sont présentées tableau 1. De gauche à droite, ces quatre classes se distinguent notamment par leurs horizons de déclenchement temporel, leurs efficacités et leurs complexités respectives. La protection « choc piéton » est une mesure de sécurité secondaire alors que le pré-crash piéton et la prévention de choc piéton sont deux stratégies de sécurité primaire complexes. L'alerte piéton est considérée comme un mode de sécurité informative, son intérêt paraît limité (cf. § 1.4).

	Protection « choc »	Pré-crash	Prévention de choc	Alerte
Principe	agir à partir du premier impact	agir peu avant l'impact devenu inévitable	agir tant que le choc est encore évitable	avertir le piéton et / ou le conducteur, lorsqu'un risque est détecté
Dispositifs	<i>passifs</i> : absorption par le capot, les ailes ou le pare-choc, <i>réactifs</i> : soulèvement du capot (amortir choc avec tête du piéton), airbag piéton	préparation des systèmes réactifs utilisés en protection « choc », déclenchement du freinage d'urgence	pilotage de la trajectoire du véhicule : changement (automatique) de direction et / ou d'allure	alerte conducteur et / ou piéton, modification des trajectoires à leurs initiatives
Avantages	réduction de la violence du premier impact	très nette réduction de la violence du choc	évitement de l'impact	contrôle par le conducteur et / ou le piéton
Limites	effet catapulte probable : violence impact avec sol augmente	impact non évité, complexité	complexité	efficacité, temps de réaction conducteur et / ou piéton
Décision	systèmes réactifs : détection de « choc piéton »	Détection de piétons, prédiction de chocs véhicule-piéton		
Points à traiter	intérêt à démontrer	faisabilité, législation	faisabilité	ergonomie : acceptabilité conducteurs

TAB. 1 – Comparaison entre les stratégies de protection.

2.2 Système de protection de piéton

Dans l'idéal, un système complet de protection des piétons serait équipé de toutes les stratégies abordées au §2.1. Leur déclenchement serait progressif, en fonction de la situation extérieure, des caractéristiques estimées de l'impact et adaptatif pour tenir compte du comportement du conducteur [5, 6].

Un système adaptatif complet de protection de piétons est décrit figure 1. Il comporte les capteurs de détection et d'estimation de l'état actuel : véhicule, conducteur, environnement, objets et obstacles de l'environnement. Ces informations sont ensuite traitées et interprétées. La prédiction des états futurs du véhicule et des piétons permet d'évaluer le risque lié à la situation actuelle. En cas de danger, une contre-mesure est sélectionnée et déclenchée.

Dans le cadre de cette thèse, une partie du système décrit figure 1 est étudiée : la détection de piétons pour la prédiction de chocs véhicule-piéton (V-P) et le déclenchement d'une contre-mesure simple de type pré-crash, réalisée dans les blocs détection de piétons et estimation de leurs positions et vitesses (M_D , M_E), prédiction de choc V-P (M_P) et sélection de la meilleure contre-mesure (M_S).

Un exemple de déclenchement progressif des contre-mesures en fonction du temps avant impact estimé, t_{ti} (time to impact), est donné figure 2. Plusieurs niveaux de performance de la prédiction de chocs peuvent être requis, en fonction de la contre-mesure à déclencher. Cela renforce le besoin et l'intérêt de méthodes d'obtention de la probabilité de choc et de l'estimation des caractéristiques de l'impact.

2.3 Détection de choc et prédiction de choc

Lors d'un accident véhicule-piéton, la sécurité primaire et la sécurité secondaire nécessitent des prises de décision de types différents :

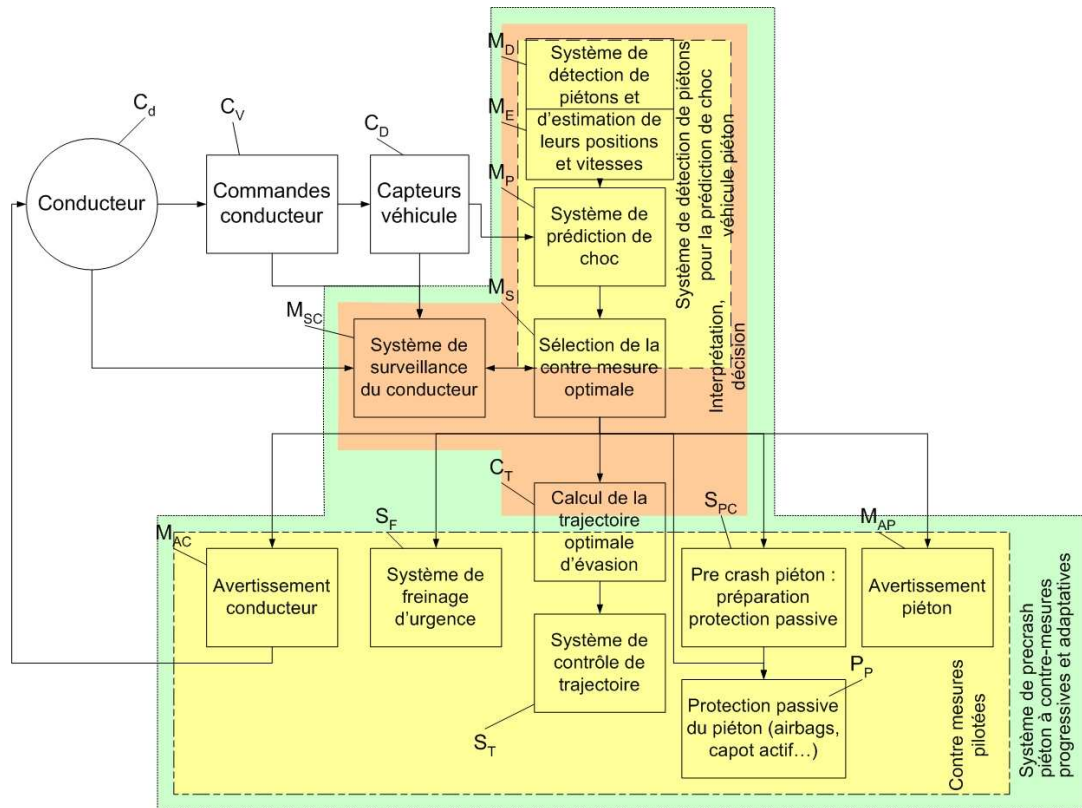


FIG. 1 – Système adaptatif complet de protection des piétons [6].

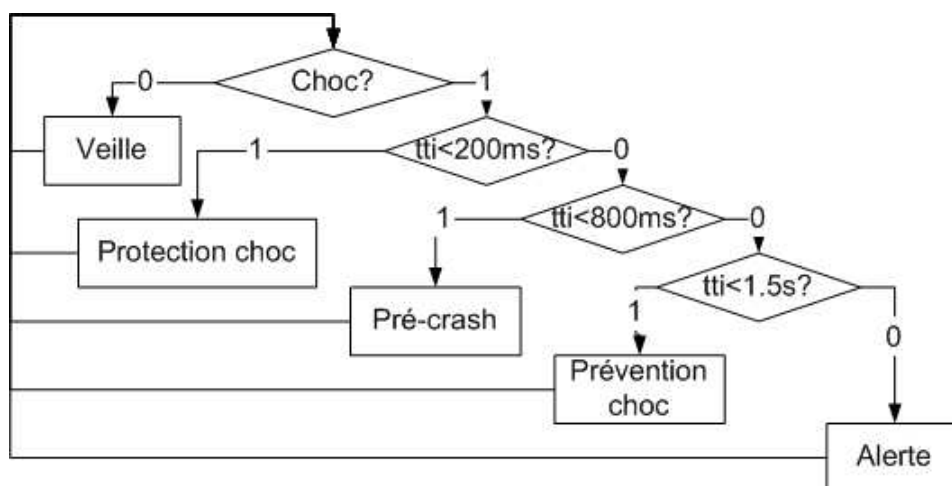


FIG. 2 – Déclenchement des contre-mesures en fonction du temps avant impact (tti) [5].

Détection de choc véhicule-piéton : cette détection est effectuée lorsque le piéton est en contact avec la face avant du véhicule. Selon les cas, le système est dédié à la détection de piétons ou il s'agit d'un système plus général, qui détecte la présence d'obstacles au niveau du pare-choc avant et qui effectue ensuite une classification (figure 3 a), la détection de choc V-P permet de déclencher des dispositifs de sécurité secondaire (action après le premier impact).

Prédiction de chocs véhicule-piéton : il s'agit de piloter des dispositifs de sécurité primaire, d'anticiper un choc : d'abord détecter des piétons devant le véhicule, puis prédire si leurs trajectoires présentent des risques de choc (figure 3 b).

L'impact des mesures de sécurité secondaire (protection choc) apparaissent limitées, alors que les stratégies de sécurité primaire sont plus prometteuses. Dans le cadre de cette thèse, seule la sécurité primaire est prise en considération et plus particulièrement la spécification et l'évaluation d'un système de détection de piétons pour la prédiction de chocs véhicule-piéton.

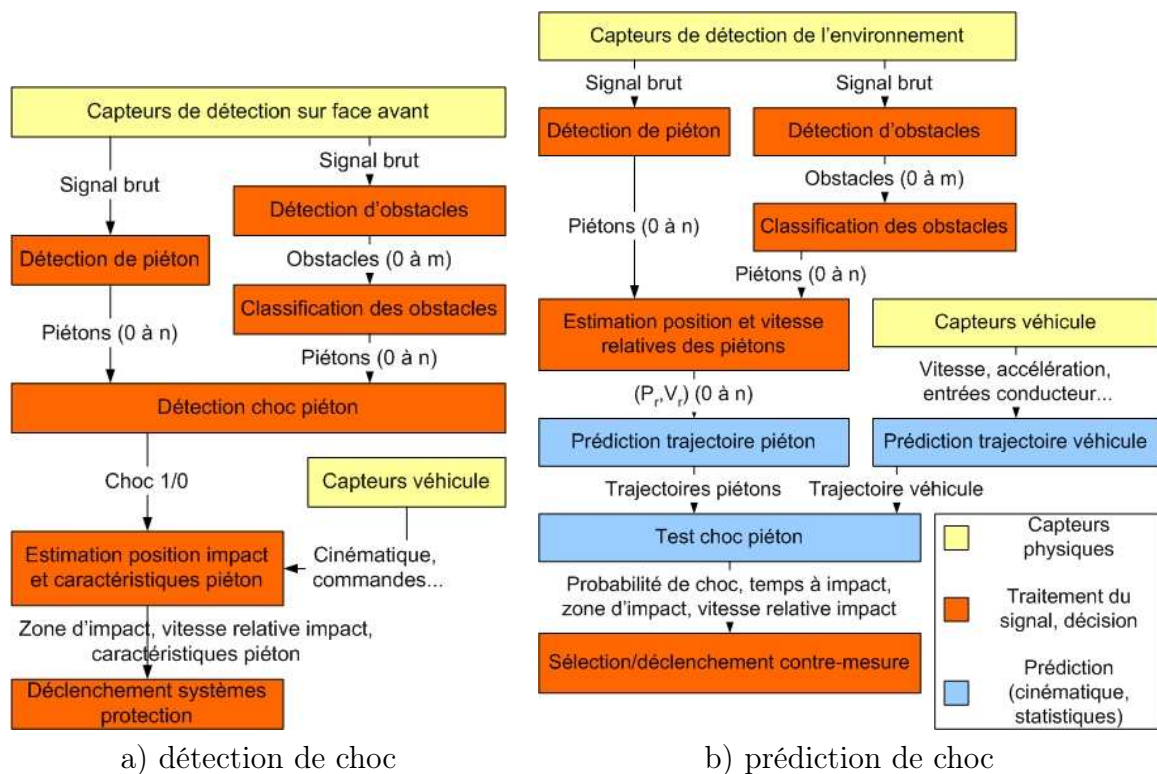


FIG. 3 – Protection des piétons : décisions pour les sécurités secondaire et primaire [5].

3 Détection de piétons pour la prédiction de collisions véhicule-piéton

Dans le cadre de cette thèse, la détection de piétons pour la prédiction de chocs véhicule-piéton ainsi que le déclenchement d'une contre-mesure simple et parfaite sont étudiés. Jusqu'à présent, peu de publications concernent des systèmes complets, alors que les travaux sur la détection de piétons sont déjà nombreux. L'objet de cette thèse est d'étudier la faisabilité d'un système de prédiction de choc véhicule-piéton.

3.1 Enchaînement des décisions

Un système de détection de piétons pour la prédiction de choc V-P génère et utilise les informations de détection d'un piéton à risque devant le véhicule et des caractéristiques de l'éventuel impact afin de commander ou de déclencher des actions dans le but de le protéger.

Compte tenu de sa complexité, le processus de détection de piétons pour la prédiction de chocs véhicule-piéton se découpe en quatre phases de traitement :

1. *détection de piétons* dans l'environnement avant du véhicule, cette étape est décomposable en deux décisions :
 - détection d'obstacles,
 - classification des obstacles détectés et sélection de la classe « piéton »,
2. *estimation* de leurs positions et de leurs vitesses relatives,
3. *prédiction de chocs* dans l'horizon de temps ΔT , composée de :
 - *estimation du risque* de choc,
 - le cas échéant, estimation des caractéristiques du choc,
4. *sélection de la contre-mesure* à déclencher.

3.2 Contraintes industrielles

Les moyens de protection engendrent des contraintes sur le processus de prédiction de chocs. L'application visée étant un dispositif de sécurité destiné à être installé sur un grand nombre de véhicules, sa fiabilité doit être irréprochable. Le taux de d'événements gênants pour le conducteur (déclenchements intempestifs) dépend de la contre-mesure. Ces contraintes sont synthétisées dans le tableau 2.

Moyen de protection	Situation	Réversibilité	Tolérance fausses alarmes	Contrainte décision correcte
Protection « choc »	Choc	Faible	Nulle	Grande
Pré-crash	Urgence à choc	Moyenne	Faible	Grande
Prévention choc	Accident à urgence	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Alerte	Accident	Grande	Moyenne	Faible

TAB. 2 – Contraintes associées aux moyens de protection.

À la nécessité d'évaluer le risque lié à une situation et de déclencher la ou les contre-mesures adéquates s'ajoute la contrainte « temps réel ». Prédire un choc est une problématique

spatio-temporelle où les données ont une durée de vie limitée. De plus, les stratégies de contre-mesures requièrent une durée minimum entre le début de leur déclenchement et l'instant où elles seront pleinement efficaces. Il s'agit souvent de contraintes physiques sur lesquelles il est difficile d'agir. Par exemple, à 40 km/h (11,11 m/s), un véhicule parcourt un peu plus d'un mètre en 100 ms. En cas de freinage d'urgence, le temps d'arrêt est légèrement supérieur à 1 s et la distance parcourue est supérieure à 7 m. D'après les spécifications de Renault, les traitements logiciels chargés de la prise de décision en mode « pré-crash » devront être exécutés à une cadence comprise entre 20 et 100 Hz.

4 Organisation de cette thèse

4.1 Approche utilisée

Dans un premier temps, les accidents véhicule-piéton sont étudiés afin de définir le périmètre de cette thèse et d'identifier les contraintes sur la détection de piétons et la prédiction de collisions. L'accidentologie générale, la méthode d'analyse d'un accident par le modèle séquentiel et l'approche des scénarios-types pour classer les accidents sont présentées. Afin de compléter les connaissances sur l'accidentologie des piétons, quatre-vingt-seize accidents mortels ont été analysés. Ces accidents, ainsi que vingt-six autres cas, ont été classifiés. La base de scénarios-types a été enrichie et trois niveaux de priorité ont été établis. La répartition statistique de ces accidents est présentée. Le rôle aggravant de certains facteurs est confirmé. Le déroulement des accidents est mieux connu, grâce à des informations sur la cinématique et les circonstances. Cette étape sur les accidents de piétons est présentée au chapitre 1.

Une fois le contexte des accidents véhicule-piéton connu, le comportement des piétons est examiné. Les principaux résultats issus de l'état de l'art sur l'observation des piétons et en particulier sur leur cinématique sont donnés. Les différentes approches pour modéliser les piétons sont abordées. Un seul modèle, reposant sur une marche aléatoire intégrée, a pour finalité la prédiction de choc véhicule-piéton, mais comporte quelques limitations qui ne permettent pas de l'utiliser pour cette thèse. Un nouveau modèle de trajectoires, probabiliste et basé sur quatre états discrets qui régissent le comportement du piéton, est proposé. La comparaison avec le modèle existant permet d'en apprécier les apports et conclut le chapitre 2.

Les connaissances sur le déroulement des accidents et le modèle probabiliste de comportement des piétons permettent alors l'estimation de la probabilité de choc véhicule-piéton. L'état de l'art sur la détection et la prédiction de collisions est balayé. Après une présentation des notations employées, des algorithmes de prédiction de choc véhicule-piéton sont proposés. La prédiction « nominale » est traitée rapidement. C'est essentiellement la prédiction « probabiliste » qui est approfondie. Cette prédiction est réalisée par des méthodes de Monte Carlo qui permettent de résoudre numériquement un problème difficile. La puissance de calcul requise par les simulations de Monte Carlo de type primitif étant importante, des méthodes de réduction dynamique de variance par « splitting » et « roulette russe », ainsi que l'exploitation de la propriété « déterministe par morceaux » du modèle proposé sont mis en oeuvre et permettent des gains sensibles. Les algorithmes de prédiction de choc sont décrits au chapitre 3.

Les performances de la prédiction de chocs véhicule-piéton peuvent être estimées au moyen de simulations. Une base de situations-tests est obtenue grâce aux connaissances sur les ac-

accidents véhicule-piéton. La faisabilité d'un système embarqué de détection de piétons pour la prédiction de chocs véhicule-piéton est évaluée. Les performances de la prédiction de chocs « probabiliste » sont d'abord évaluées, en supposant parfaite l'estimation de l'état actuel. Même dans ce cas, les résultats obtenus ne sont pas parfaits, à cause de trop grandes incertitudes sur les trajectoires futures et l'aspect non rigide et déformable du piéton. Puis le système de détection de piétons est modélisé en tenant compte de son champ de détection réel. Une configuration géométrique de ce champ est validée. Les incertitudes sur l'estimation de l'état actuel du piéton sont ensuite modélisées sous forme de bruit multiplicatif. Ces bruits suivent des lois respectivement normale et de Cauchy, pour simuler un nombre important d'outliers. L'évolution des performances pour différentes incertitudes, donnée à titre d'exemple, permet de spécifier les contraintes sur un système réel. L'outil de simulation obtenu est modulaire et permet d'évaluer d'autres configurations de sous-systèmes de détection, estimation ou prédiction, afin de comparer différentes solutions techniques.

Cette thèse est conclue par un bilan des travaux présentés et des contributions. Des perspectives d'extension ou d'approfondissement sont proposées.

4.2 Structure

Le découpage de cette thèse en six chapitres est visible figure 4.

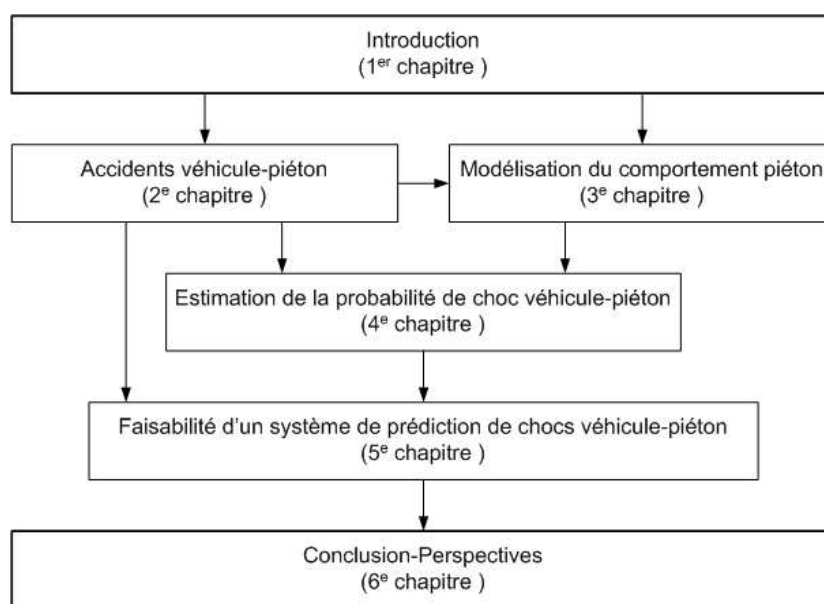


FIG. 4 – Plan de la thèse.

Ce premier chapitre pose le problème et définit le cadre des recherches. Le chapitre 2 décrit les accidents de piétons. Un nouveau modèle de piéton est proposé au chapitre 3. Les algorithmes de prédiction de chocs V-P sont proposés au chapitre 4. Le fonctionnement d'un système simple de protection de piétons est étudié au chapitre 5. Le chapitre 6 conclut cette thèse.

Chapitre 1

Accidents véhicule-piéton

1.1 Introduction

1.1.1 Motivations

Cette recherche sur les accidents véhicule-piéton (V-P) a été demandée par Renault, comme immersion à la problématique de la thèse. La connaissance des accidents véhicule-piéton, de leurs déroulements et mécanismes, en cerner les causes principales et les facteurs aggravants est possible grâce à l'étude de cas réels d'accidents.

La conception et la réalisation d'un système embarqué sur véhicule de détection de piétons pour la prédiction de choc véhicule-piéton passe également par la connaissance de la fréquence et de la gravité des accidents étudiés.

L'objectif de ce chapitre est de comprendre le déroulement des différentes phases d'un accident véhicule-piéton. Ces informations permettront d'identifier les priorités immédiates pour améliorer la sécurité des piétons. Des données fiables sur les situations véhicule-piéton se terminant potentiellement par un accident (accidentogènes) serviront à définir les conditions initiales de la base de situations tests.

1.1.2 Enjeux

Globalement, depuis une trentaine d'années, les statistiques montrent que, dans les pays à revenus élevés, le nombre annuel de piétons tués diminue régulièrement [7]. Cependant, dans ces pays, le nombre de piétons morts, en 2003, reste important comme le montrent les statistiques du tableau 1.1 [8]. Selon un rapport de l'UNECE, le nombre de piétons victimes d'un accident corporel reste trop élevé [7].

Zone	Piétons	Ensemble accidents	% piétons
UE (à 15 sauf Belgique, Grèce et Italie)	3 770	26 961	14%
États-Unis d'Amérique	4 749	42 643	11%
Japon	2 739	8 877	31%

TAB. 1.1 – Morts en 2003, des suites d'un accident de la route et part des piétons [9].

Quand les décès sont évités, les lésions sont souvent graves et les coûts humains et économiques lourds [10–14]. Le sort des piétons constitue un enjeu de société de taille.

Les données sur les accidents de la circulation présentent de grands similarités entre pays comparables. Le cas de la France sera pris comme exemple principal pour illustrer l'état des connaissances sur les accidents véhicule-piéton dans le cadre de cette thèse.

La part des accidents de piétons varie d'un pays à l'autre. À populations à peu près égales, il y a moins de victimes d'accidents mortels de la circulation en Grande-Bretagne (environ 3500 par an) qu'en France (un peu plus de 6000 par an). Le nombre de morts piétons (un peu moins de 800 par an) y est plus élevé qu'en France [9]. Les piétons tués constituent environ 13% des morts sur la route en France et plus de 20% au Royaume-Uni [15]. Ces écarts sont essentiellement attribués aux différences des réseaux routiers.

Ponctuellement, la mise en application de nouvelles mesures permet d'obtenir des résultats éloquentes. Récemment, la campagne volontaire du gouvernement français contre l'insécurité routière a permis de réduire de façon spectaculaire le nombre de morts sur les routes. Le nombre de piétons tués a sensiblement diminué : 626 victimes en 2003, contre 866 en 2002 soit -28% [16]. Des mesures de ce genre ne pourront malgré tout pas faire disparaître tous les accidents. Passées l'intégration par les conducteurs des nouvelles dispositions légales et l'adaptation à leur mise en application, le nombre de victimes piétons continuera de décroître lentement, comme dans le passé [7].

Dans les autres pays de l'OCDE, la tendance est similaire : il y a diminution du nombre de piétons victimes d'accidents mais elle ne constitue que quelques pour cent de moins par an.

1.1.3 Définitions

1.1.3.1 Accident de la circulation

Un accident de la circulation est : « tout accident impliquant au moins un véhicule routier en mouvement, sur une route publique ou privée à laquelle le public a le droit d'accès. » Pour simplifier, les termes « accident », « crash » se référeront à un accident de la circulation. Un « sur-accident » est un accident causé par un autre accident, ayant eu lieu quelques instants auparavant.

1.1.3.2 Gravité d'un accident

Quatre ordres de gravité sont utilisés mondialement pour décrire les conséquences d'un accident [17] :

Accident matériel : tout accident n'entraînant que des dommages matériels.

Accident corporel : tout accident dans lequel au moins une personne est tuée ou blessée.

Accident mortel : tout accident corporel entraînant la mort d'une personne. Un accident est dit mortel si la victime décède sur le coup ou des suites de l'accident, dans les 30 jours [17].

Accident non mortel : tout accident corporel autre qu'un accident mortel. Il y a alors au moins une personne blessée. Deux cas se présentent :

1. personne grièvement blessée : hospitalisation supérieure à 24 heures,
2. personne légèrement blessée : personne blessée, mais non grièvement blessée.

1.1.3.3 Accident véhicule-piéton

Un piéton accidenté est « toute personne, autre qu'un conducteur ou un passager au sens des définitions ci-dessous, impliquée dans un accident corporel [17]. » Un conducteur accidenté est « toute personne impliquée dans un accident corporel et qui conduisait un véhicule routier au moment de l'accident. » Un passager accidenté est « toute personne, autre que le conducteur, impliquée dans un accident corporel et qui se trouve dans ou sur un véhicule routier ou y embarquait ou en débarquait ».

Un accident véhicule routier-piéton est « tout accident corporel impliquant un ou plusieurs véhicules routiers et un ou plusieurs piétons ».

1.1.4 Piétons et autres usagers vulnérables de la route

Le piéton fait partie d'une catégorie plus large, celle des « usagers vulnérables de la route ». Cette appellation regroupe, selon les cas, les deux roues, motorisés ou non, les piétons, ainsi que les personnes se déplaçant sur des patins ou planches à roulettes, trottinettes... Une synthèse des différences et points communs entre ces populations est :

- Les deux roues motorisés sont d'emblée considérés comme hors du champ d'étude : ils n'ont pas grand chose en commun avec les piétons, leurs comportements sont très différents, ainsi que les déroulements des accidents. Ils sont eux-mêmes souvent impliqués dans des accidents avec des piétons.
- L'analyse proposée en annexe B montre que, dans la majorité des cas, il y a très peu de ressemblances entre un accident de cycliste et un accident de piéton : les phases primaires sont différentes (le cycliste circule généralement sur la chaussée, à une vitesse supérieure à celle des piétons). En général, le nombre de victimes cyclistes est inférieur de moitié à celui des victimes piétons.
- L'amateur de roller ou de patins à roulettes, quand il a un comportement « normal », apparaît comme un piéton extrême : ses vitesses (plus de 3 m/s), accélérations et hauteur (+10 cm) sont supérieures à celles d'un piéton moyen. Le nombre d'accidents mortels impliquant des véhicules et des rollers est très faible (cf. annexe C). Moins de cent accidents de ce type sont recensés tous les ans en France [18].

À l'issue de ce bilan, il s'avère que, globalement, les accidents véhicule-piéton sont spécifiques et causent un nombre plus important de victimes que ceux impliquant des rollers et/ou des cyclistes.

1.1.5 Organisation du chapitre

Dans ce chapitre, la partie 1.2 présente l'accidentologie. L'état de l'art sur les recherches portant sur la phase directement antérieure à la collision V-P est donné § 1.3. La partie 1.4 expose l'analyse et la classification de procès verbaux d'accidents mortels de piétons en scénarios-types d'accidents. Une hiérarchie entre les différentes situations est établie et éprouvée. Pour conclure, les principaux résultats obtenus sur les accidents véhicule-piéton sont résumés au § 1.5.

1.2 L'accidentologie

1.2.1 Définition

L'accidentologie est l'étude des accidents. C'est une discipline faisant appel à un spectre de compétences étendu : de l'ingénieur au médecin, en passant par le psychologue, l'expert en mécanique ou en sciences cognitives [19]. Il s'agit d'atteindre le plus haut degré d'entraide et d'échange d'informations pour obtenir une vision globale et exhaustive des accidents.

L'évolution de l'accidentologie est retracée dans [20]. Cette discipline est très étroitement liée à la sécurité routière : son but est de fournir des données reflétant de façon objective la situation d'un accident. Après des débuts laborieux et empiriques dans la première moitié du XX^e siècle, elle est restée quelques décennies sous une forme « primitive » [21]. La démocratisation, dans les pays riches, de l'usage de l'automobile a réellement eu lieu au début de la seconde moitié du XX^e siècle. En conséquence, les nombres d'accidents et de victimes de la circulation ont très vite augmenté.

L'accidentologie passe dans sa phase « moderne » dans les années 1970. Elle commence alors à se différencier de la traumatologie pure. Un accident est alors étudié de manière plus fine et plus nuancée. Les chercheurs et accidentologues de terrain tentent désormais de le comprendre dans sa globalité, en tenant compte de sa grande complexité [19].

1.2.2 Déroulement d'un accident de la circulation

Les accidentologues découpent un accident en trois phases :

- la phase primaire, ou pré-crash, constituée par les instants qui précèdent le choc,
- la phase secondaire démarre à l'instant de choc et dure jusqu'à ce que les véhicules et les corps impliqués dans l'accident atteignent une position d'équilibre - au sens physique,
- la phase tertiaire, en fonction de l'accident, comprendra l'arrivée des secours, des forces de l'ordre... jusqu'à ce que les véhicules, les corps et/ou les débris aient été évacués ou dégagés et la circulation rétablie normalement.

La prédiction des accidents V-P intervient lors de la phase primaire. Autrefois résumé à la simple fatalité, le champ d'interprétation des causes et du déroulement d'un accident s'explique par l'analyse multi-causale, l'étude des erreurs humaines et grâce au modèle séquentiel [22].

Des études du système homme-véhicule-environnement, dites analyses systémiques, permettent de repérer et d'expliquer les relations de causalité dans l'enchaînement spatio-temporel de l'accident [22].

Le modèle séquentiel, issu de ces études systémiques, a été développé dans les années 1980-90 par le département « Mécanismes d'Accidents » de l'INRETS. Dans ce modèle, décrit dans [23, 24], la phase primaire d'un accident est divisée en quatre situations :

1. la situation de conduite,
2. la situation d'accident : première rupture, prémices au basculement dans la situation 3,
3. la situation d'urgence : seule une manœuvre extrême permettrait d'éviter la collision,
4. la situation de choc.

Ce mode d'interprétation est choisi pour étudier le déroulement des accidents dans le cadre de cette thèse.

1.2.3 Informations brutes sur les accidents

Les informations disponibles pour l'étude des accidents sont des données brutes relevées directement sur les lieux des accidents, ou des exploitations et des analyses de ces données.

1.2.3.1 Sources et formats des informations

Les informations sont recueillies sur les lieux des accidents et auprès des personnes impliquées ou des témoins éventuels. Dans les pays à revenus élevés, les informations proviennent essentiellement de trois sources. Dans le contexte français, ces sources d'informations sur les accidents corporels de la circulation sont :

1. Les données collectées par les autorités compétentes, forces de l'ordre : Gendarmerie et Police Nationales. Malgré une uniformisation, les informations disponibles sont variables et parfois subjectives. Cet accès à l'information sur les accidents n'est pas toujours aisé (secret d'instruction, respect de la vie privée). Les données se présentent sous forme de :
 - procès verbaux d'accidents mortels (PVM),
 - fichiers de procès verbaux d'accidents corporels (PVC) non mortels, au 1/50^e (2% des cas sont prélevés et rapportés dans ce fichier),
 - bulletins d'analyse d'accidents corporels de la circulation (BAAC), qui synthétisent un ensemble d'accidents.
2. Les données recueillies directement par des accidentologues (deux ou trois experts) sur le terrain selon la démarche des Études Détaillées d'Accidents (EDA) [19, 25]. Chacun des experts est responsable du recueil sur le terrain d'un type d'information bien défini :
 - recueil des témoignages et interrogation des personnes impliquées et des témoins éventuels, généralement par un psychologue,
 - collecte des informations sur le contexte, l'infrastructure et l'environnement,
 - relevé des données sur le ou les véhicules impliqués dans l'accident.
3. La majorité des accidents matériels fait uniquement l'objet de constats pour les compagnies d'assurances. L'information contenue n'est pas exploitable à cause de la simplification. Les accidents véhicule-piéton, corporels dans la majorité des cas, sont peu concernés par cette source.

La mise en place d'enregistreurs de données en cas d'accidents, EDR : Event Data Recorder, apportera des informations plus fiables sur les accidents (telles que des données cinématiques, les commandes du conducteur...) et permettra d'améliorer la compréhension de leurs déroulements [26].

1.2.3.2 Complémentarité des méthodes de recueil

La figure 1.1 fournit une idée qualitative du niveau d'information fourni par chaque source. Il apparaît qu'aucune de ces sources n'apporte à elle seule l'ensemble des informations de manière exhaustive. La collecte d'informations sur le terrain est coûteuse. Un PVC ou PVM consiste en un rapport de Police ou de Gendarmerie rendant simplement compte des faits, avec une interprétation basique. De l'autre côté, une EDA tentera de reconstruire de façon exhaustive les différentes phases de l'accident. Dans ce dernier cas, le temps passé sur un cas

à recouper toutes les informations et obtenir la reconstruction cinématique sera important (plusieurs personnes-jours pour une EDA et quelques heures pour un BAAC).

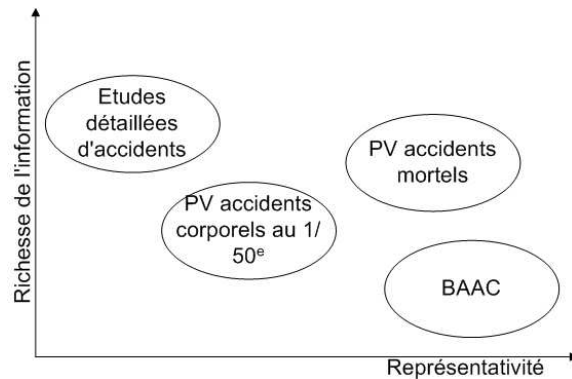


FIG. 1.1 – Niveaux d'information sur les accidents corporels de la circulation routière [27].

1.2.4 Analyse et exploitation des données recueillies sur les accidents

Les trois principales approches employées pour traiter les données recueillies sont décrites dans les paragraphes suivants.

1.2.4.1 L'approche clinique

Appelée également approche « micro-accidentologique », elle consiste à s'intéresser à un accident en particulier. Chaque cas est traité séparément et indépendamment. Le but est de reconstruire le déroulement d'un accident, généralement « à l'envers ». À partir de la situation finale, et grâce aux indices recueillis, il est possible de remonter dans le temps, jusqu'au choc, puis jusqu'à la situation initiale et normale. Cela donne :

Phase tertiaire : analyse des actions et procédures mises en œuvre par les secours.

Phase secondaire : le choc est reconstruit et les trajectoires des différents mobiles après le premier choc : véhicules, corps, obstacles éventuels, sont modélisées avec précision. Certains résultats comme l'estimation des vitesses d'impact, de la zone de choc, donnent une vue d'ensemble de ce qui est envisageable [28–35]. La connaissance de la phase secondaire est indispensable pour atteindre la phase primaire (reconstruction inverse).

Phase primaire : reconstruction des trajectoires, à partir du premier impact, jusqu'à la situation de conduite normale. La cinématique et une bonne connaissance de la dynamique véhicule ne suffisent pas. La méthodologie de l'EDA et l'application du modèle séquentiel permettent de proposer le scénario d'accident le plus plausible [19].

L'expérience et les connaissances des experts en accidentologie jouent un rôle prépondérant dans le choix des différents paramètres de la reconstruction. Dans certains cas, pour limiter la subjectivité humaine, des méthodes de Monte Carlo permettent d'estimer les paramètres les plus plausibles [28]. Grâce à des simulations numériques, un grand nombre de situations est généré et plusieurs combinaisons de paramètres tels les vitesses, les forces de freinages, les temps de réaction... sont testées [36].

1.2.4.2 Épidémiologie quantitative

Également appelée « macro-accidentologie », elle est utilisée pour traiter un nombre important de cas d'accidents, en exploitant la puissance des outils informatiques et statistiques. Elle consiste en une étude descriptive ainsi qu'en une analyse du risque [37].

Certaines populations plus exposées au danger peuvent ainsi être décelées, comme les personnes âgées, les jeunes conducteurs. Des mesures de sécurité en sont alors déduites : prévention par la sensibilisation et la réduction des facteurs aggravants, tels le non port de la ceinture et l'alcoolémie ou la fatigue [38–40].

L'épidémiologie permet également de s'apercevoir que la gravité des accidents varie sensiblement : certains types d'accidents ne sont pas fréquents, mais très souvent mortels [41].

Cette approche reste artificielle et trop générale. Les caractéristiques spécifiques au déroulement des accidents ne sont pas suffisamment prises en compte [42–47].

1.2.4.3 Classification en scénarios-types

Les « scénarios-types d'accidents » sont une approche intermédiaire entre l'épidémiologie quantitative et les études cliniques, mise en place par le Département MA de l'INRETS [48].

La classification en scénarios-types consiste à regrouper des accidents présentant des caractéristiques communes dans leur déroulement [24, 49, 50]. Dans un premier temps, les circonstances de l'accident sont décrites, grâce aux EDA ou PV. Puis les accidents présentant des similitudes sont regroupés au sein d'une classe qui sera décrite par un scénario-type [23]. Pour finir, l'application des statistiques, menée au sein de chaque classe, permet d'identifier les caractéristiques réellement spécifiques et propres à un scénario-type. La connaissance de la répartition statistique des différents types d'accidents permet d'en connaître la représentativité.

L'approche par les scénarios-types est retenue pour cette thèse, du fait d'un bon compromis entre représentativité et niveau de détail.

1.3 État de l'art sur les accidents véhicule-piéton

1.3.1 Étude épidémiologique de l'INRETS DERA

En 1995, une équipe de l'INRETS Département Évaluation et Recherche en Accidentologie (DERA) a publié une étude épidémiologique sur les accidents de piétons [27]. Après une première analyse descriptive des données (obtenues sur des PV corporels de 1989 à 1992 et des PVM de mars 1990 à février 1991) et une étude sur le rôle de l'alcoolémie, une typologie des piétons a été proposée. Cette dernière est obtenue par une Analyse des Correspondances Multiples, ACM (elle permet d'étudier et de représenter graphiquement, les associations et relations deux à deux de plusieurs variables qualitatives) et une Classification Ascendante Hiérarchique, CAH (regroupement progressif des individus d'une population suivant leur degré de ressemblance, jusqu'à l'obtention d'une classe unique les regroupant tous). Quatre classes de piétons impliqués dans des accidents sont obtenues :

1. les piétons âgés (42%),

2. les piétons accidentés la nuit, hors agglomération, avec alcoolémie importante (supérieure à 1 g d'alcool par litre de sang) (34%),
3. les enfants (13%),
4. les piétons accidentés sur le trottoir, les chocs contre obstacles fixes, les pertes de contrôle et les sur-accidents (11%).

Ces travaux ont montré l'existence de catégories distinctes de piétons impliqués. Il s'agit particulièrement des piétons âgés et, dans une moindre mesure, des enfants. L'importance des accidents de nuit, ainsi que l'implication de l'alcoolémie sont également soulignées.

Beaucoup de piétons impliqués dans les accidents n'étaient pas dans un état normal (mauvaise perception du risque, des distances, comportement irrationnel...) à cause de leur taux d'alcoolémie élevé.

Ce travail s'est concentré sur les caractéristiques « statiques » des piétons essentiellement. L'étude fournit des résultats pertinents sur la population des piétons accidentés, mais peu de résultats exploitables sur le déroulement des accidents de piétons.

1.3.2 Études épidémiologiques aux États-Unis

Des statistiques sur les accidents de piétons en Floride sont présentées et comparées aux données d'autres États américains dans [51] :

- évolution annuelle du nombre de piétons victimes d'accidents de la route,
- taux d'exposition des piétons à un accident,
- tranches horaires pendant lesquelles les accidents se déroulent (importance de la nuit),
- identification des facteurs liés à l'évolution du nombre d'accidents de piétons,
- répartition de la mortalité en fonction de la limite de vitesse,
- activités des piétons au moment des accidents.

Ces informations, non détaillées ici, montrent de grandes similarités avec les statistiques françaises.

1.3.3 PBCAT : un outil informatique pour la classification

Le Pedestrian and Bicycle Crash Analysis Tool (PBCAT) a été développé en 1999, par des chercheurs de l'Université de Caroline du Nord, pour le compte de la NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration, et de la FHWA, Federal Highway Administration, [52, 53]. Cet outil s'appuie sur une étude menée au milieu des années 1990, qui a remis à jour la base de connaissances sur les types d'accidents de piétons et cyclistes aux États Unis [18].

Le logiciel aide les accidentologues à affecter chaque accident à la catégorie la mieux adaptée, grâce à une série de questions/réponses interactives. Il permet ensuite de s'intéresser aux propriétés de chaque classe d'accidents. Le PBCAT a été utilisé avec succès pour une étude sur les accidents de piétons à Orlando et en Caroline du Nord [41, 54].

Le principal avantage du PBCAT est l'atténuation des problèmes de subjectivité humaine lors de la classification de nouveaux accidents. C'est le logiciel qui attribue un type à l'accident. Le problème de classification est alors déplacé au niveau de la définition et de l'établissement des différents types d'accidents. La moindre erreur au départ restera présente tout au long de la classification, mais la cohérence est assurée.

Cette classification fournit des informations dont la nature intéresse plus directement les personnes chargées de sécurité routière locale, de l'équipement et d'infrastructure que des ingénieurs de l'automobile chargés de la sécurité des occupants et piétons. En effet, si le but final est le même (réduction du nombre d'accidents sur la route et de leur gravité), les moyens et champs d'action diffèrent sensiblement. Le principal intérêt de ces travaux est de disposer d'une classification complète des accidents véhicule-piéton. Les résultats obtenus dans la partie suivante (§ 1.4) seront comparés aux données américaines.

1.3.4 EDA et reconstructions du CEESAR Amiens

Pendant plusieurs années, une équipe de trois accidentologues « de terrain » du Centre Européen d'Études de Sécurité et d'Analyse des Risques (CEESAR) s'est rendue sur les lieux des accidents en même temps que les autorités policières et les premiers secours, à Amiens et ses alentours. Suivant la démarche des EDA, ils ont relevé 26 accidents de piétons et ont procédé à la reconstruction cinématique complète de 12 cas. Les résultats obtenus apportent des détails sur le comportement dynamique en phase primaire.

Le nombre de cas traités est, en contrepartie, faible. Les vingt-six accidents étudiés ne sont pas représentatifs de l'ensemble des accidents à l'échelle nationale ou européenne.

1.3.5 Scénarios-types de l'INRETS Département MA

Les accidents de piétons ne constituaient initialement que quelques scénarios-types parmi d'autres. Le document le plus complet sur les accidents de piétons présente huit scénarios-types d'accidents impliquant des piétons [55]. Ils ont servi de modèle à la base de scénarios décrite dans la partie suivante.

L'importance statistique de chaque scénario-type et sa représentativité à l'échelle nationale ne peuvent pas être connues avec précision, puisque tous les accidents triés en classes provenaient de Salon de Provence et ses alentours.

1.4 Base de scénarios-types d'accidents véhicule-piéton

La synthèse de données issues de la revue de l'état de l'art est complétée par l'analyse de 96 PVM. Ces PVM et les 26 EDA disponibles sont classés pour affiner les connaissances sur les accidents de piétons. Certains résultats présentés dans des études antérieures seront validés.

1.4.1 Méthodologie

Le consortium Stupéfiants et Accidents Mortels (SAM) reçoit, depuis le début des années 2000, des procès verbaux d'accidents mortels de la circulation en provenance de l'Observatoire Français des Drogues et des Toxicomanies (OFDT). Cette étude a porté sur des accidents mortels ayant eu lieu en France métropolitaine, du dernier trimestre 2001 au deuxième trimestre 2002. Parmi les 781 dossiers examinés, 96 accidents de piétons ont été identifiés, prélevés et étudiés en détail.

Les données pertinentes pour une meilleure compréhension des accidents de piétons ont été relevées. Elles permettent de compléter la classification en scénarios-types issue des travaux de l'INRETS et d'avoir une idée plus précise de la représentativité statistique de chaque scénario [23, 49, 55, 56]. Les données extraites concernent cinq grandes catégories : le piéton, le conducteur et son véhicule, l'environnement, la route, les manœuvres à l'origine de l'accident, qui correspondent à des informations brutes. Deux rubriques supplémentaires ont été ajoutées : la codification du dossier PVM et le scénario-type.

Code Numéro Id. PVM	Scénario-type Description qualitative Numéro de scénario-type
Conducteur - Véhicule Sexe (M/F) Âge CSP Alcool - stupéfiants Passagers Zone impact véhicule Vitesse initiale (estimation) Vitesse perception danger (estimation) Vitesse choc (estimation) Réactions Autres	Piéton Sexe (M/F) Âge CSP Alcool - stupéfiants Seul / groupe Allure Motif déplacement Manœuvre (traverse, longe la voie, immobile) Sens de traversée ($G \rightarrow D, D \rightarrow G$) Sur passage piéton (O/N) Réactions Autres
Environnement Agglomération (O/N) Intersection (O/N) Éclairement (jour, nuit, aube, crépuscule) Éclairage public (absence, allumé, non allumé) Conditions atmosphériques (normales, neige/grêle, tempête, pluie légère, pluie forte, brouillard, temps éblouissant, vent fort, temps couvert) Signalisation Abords immédiats Visibilité Obstacles Trafic véhicules	Route Vitesse réglementaire Sens unique, double sens Chaussées séparées, sens variable Rectiligne, S, rétrécissement Entrée courbe, courbe, sortie courbe Route plate, montée, descente Sommet côte, bas descente, bombé Revêtement (Bitume, empierrement, béton, pavés, sans) Passage piéton (O/N/proximité) État surface (normale, mouillée, boue, enneigée, verglas, corps gras, déformée, gravillons, obstacle, autre état)
Dimensions (dm)	
Chaussée	Contre-allée
Trottoir	Piste cyclable
Stationnement	Terre-plein central

TAB. 1.2 – Données extraites des PVM.

Pour chaque accident, tous les paramètres relevés, présentés tableau 1.2, sont retranscrits dans un fichier unique, sous forme de tableau. Chaque dossier est analysé pour établir une description normalisée de l'accident, selon le principe des scénarios-types et du modèle séquentiel. Chacun des 96 cas est étudié et analysé selon le mode opératoire proposé figure 1.2. La classification initiale est celle des huit scénarios-types d'accidents V-P de l'INRETS [55, 56].

```

Pour chaque cas, faire
  Lecture et relevé informations
  Description normalisée de l'accident cas_actuel,
  Comparaison aux scénarios-types existants
  Si cas_actuel bien décrit par un scénario-type, alors
    ajouter cas_actuel à cette classe
  Sinon,
    comparaison cas_actuel avec cas_non_classés
    Si ressemblances importantes avec au moins un cas_non_classé
      créer une nouvelle_classe
      ajouter cas_actuel et cas_similaire à la nouvelle_classe
    Sinon,
      ajouter cas_actuel à cas_non_classés
Fin du traitement de cas_actuel

```

FIG. 1.2 – Algorithme de classification d'un PVM en scénario-type.

1.4.2 Regroupement des scénarios-types

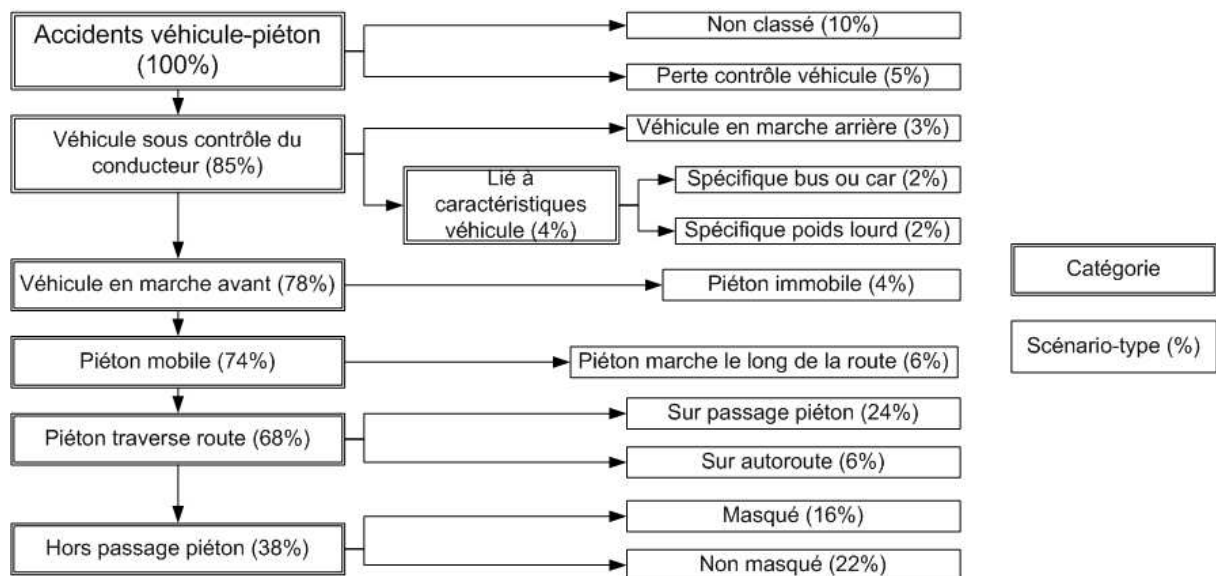


FIG. 1.3 – Arbre des scénarios-types d'accidents véhicule-piéton [57, 58].

La description des onze scénarios-types, résultat de l'analyse menée dans cette thèse, avec des variantes pour les classes les plus importantes, est disponible en annexe E.

Les données qualitatives permettent d'identifier certains facteurs dominants pour une classe donnée. Les grandeurs cinématiques, issues des reconstructions d'Amiens et d'estimations dans les PVM, permettront de décrire les situations de test au chapitre 4.

Le regroupement des scénarios présentant des similarités de déroulement et la connaissance de leurs importances statistiques permettent, figure 1.3, de repérer les déroulements les plus représentatifs. Les piétons mortellement heurtés alors qu'ils se trouvaient sur un passage piéton constituent, avec 24% des cas, le scénario-type le plus fréquent.

Un scénario-type, dont un exemple est donné figure 1.4, est caractérisé par :

- une description synthétique du déroulement,
- l'importance statistique de la classe,
- des informations sur le piéton, le conducteur et le véhicule, l'environnement, la route et la cinématique de la situation.

1.4.3 Analyse des résultats

Cette partie synthétise les principales informations qui découlent de l'exploitation des 96 PVM et de la classification en onze scénarios-types.

1.4.3.1 Fréquence des classes associées aux scénarios-types

Pour étudier la répartition statistique des différents scénarios, les résultats de l'INRETS ont été confrontés à la distribution obtenue pour les PVM. Le faible nombre de cas issus des EDA, qui sont des accidents non mortels, ayant eu lieu autour d'Amiens, ne permettent pas une exploitation statistique. Les cas de l'INRETS sont des accidents corporels dans les Bouches-du-Rhône, alors que les PVM sont des accidents mortels prélevés partout en France. Cette différence explique la création de variantes et de scénarios-types supplémentaires.

La représentativité statistique des différents scénarios-types est visible tableau 1.3.

1.4.3.2 Gravité des accidents

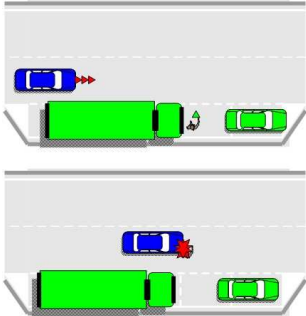
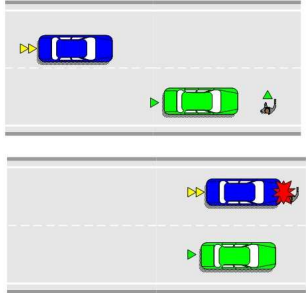
La gravité des lésions dépend de la vitesse du véhicule lors de l'impact. Les informations sur la « localisation et les manœuvres des piétons avant les accidents » apportent quelques réponses [59] :

- les accidents en rase campagne sont beaucoup plus graves que les accidents urbains,
- les accidents sur passages piétons sont moins graves que ceux ayant lieu à plus de 50 mètres de ces passages.

Le nombre de tués pour cent blessés n'est pas uniforme pour toutes les classes d'accidents, ce qui pose problème aux accidentologues [59]. Certains accidents corporels légers n'apparaissent pas dans l'analyse des PVM. Il s'agit d'accidents se produisant en agglomération, en intersection, lorsque le véhicule tourne et heurte un piéton qui traverse : la vitesse de ce premier est faible et entraîne rarement des lésions fatales.

1.4. Base de scénarios-types d'accidents véhicule-piéton

Poids statistique	
INRETS :	21% PVM : 8%

1a	1b	1c
<i>Le piéton, initialement masqué par un objet fixe (arbre, mur, abribus, panneau, véhicule stationné...), traverse la route en marchant</i>	<i>Le piéton, qui est initialement masqué, parfois accompagné et souvent jeune, surgit sur la route en courant</i>	<i>Le piéton, traverse une voie large, en milieu urbain, le trafic est plutôt dense et hétérogène, il est masqué par des véhicules en circulation ou qui se sont arrêtés pour le laisser passer</i>
	<i>Même configuration que 1a, mais le piéton court</i>	

<i>Piéton</i>		<i>Conducteur</i>	
Âge :	> 45 (1b : < 15) ans	Âge :	< 36 ans
Sexe :	6 M, 2 F	Sexe :	7 M, 1 F
Alcool :	Non	Alcool :	Non
Seul/accompagné :	Seul lors traversée	Manœuvres d'évitement :	Freine ou freine + écart
Allure :	Marche (1b : court)	Zone d'impact :	Gauche
Sens de traversée :	D → G (1c : G → D)		
Vitesse :	[1-2,5] ≈ 1,5 m/s (1b : [3-7,5] m/s)		

<i>Environnement</i>			
Jour/Nuit :	Jour	Conditions atmosphériques :	Normales
Visibilité :	OK, 1 soleil gênant	Masques :	Murs, haies, arbres, véhicules mobiles/fixes
Intersection :	Non	Agglomération :	Oui
Trafic piéton :	De faible à dense	Trafic véhicule :	De faible à dense

<i>Route</i>			
État :	5 normal, 3 mouillée	Largeur chaussée :	[5-10] ≈ 7 m
Profil vertical :	Plat (quelques montées)	Profil longitudinal :	Rectiligne

<i>Cinématique</i>			
Vitesse limite :	< 50 km/h	Vitesse initiale :	[20-70] ≈ 50 km/h
Vitesse impact :	≈ 30 km/h	t _{ti} visible :	[ε-3] s

FIG. 1.4 – Scénario type 1 : piéton masqué traversant hors passage « protégé ».

Scénario	Variante	Description	%
1	Le piéton masqué traverse hors passage piéton		[8-23] \simeq 16
	A	Le piéton, masqué par un véhicule à l'arrêt, traverse	
	B	Le piéton est initialement masqué et traverse en courant	
	C	Le piéton traverse, masqué par des véhicules sur des voies à trafic variable	
2	Le piéton traverse non masqué hors passage piéton		[18-27] \simeq 22
	A	Le piéton traverse hors passage protégé sur une voie à circulation rapide, en agglomération	
	B	Le piéton traverse en rase campagne	
3	Le piéton traverse sur passage piéton (non masqué)		[17-46] \simeq 24
	A	Le piéton traverse sur un passage piéton, non détecté par le conducteur	
	B	Le piéton traverse sur un passage piéton : danger perçu, réactions mal ou non adaptées	
	C	Le piéton traverse sur un passage piéton : le piéton et/ou le conducteur a décidé de passer malgré un feu rouge contre lui	
4	Le piéton longe la voie		[4-9] \simeq 6
	A	Le piéton longe la voie en zone urbaine	
	B	Le piéton longe la voie hors agglomération	
5	Le piéton est heurté par un véhicule en marche arrière		\simeq 3
6	Le piéton est heurté par une porte de camion qui s'ouvre brusquement		\simeq 0
7	Le véhicule impliqué est un bus/car, par manque de visibilité pour le conducteur		\simeq 2
8	Perte de contrôle		[2-9] \simeq 5
	A	Le conducteur perd le contrôle de son véhicule en ville et heurte un piéton	
	B	Le conducteur perd le contrôle de son véhicule hors agglomération et heurte un piéton	
9	Accident spécifique aux poids lourds (visibilité)		\simeq 2
10	Le piéton traverse une autoroute ou voie rapide		\simeq 6
11	Le piéton est allongé ou immobile sur la chaussée		\simeq 4

TAB. 1.3 – Résumé des scénarios-types d'accidents véhicule-piéton.

1.4.3.3 Paramètres descriptifs principaux

Les circonstances des scénarios-types d'accidents V-P sont synthétisées tableau 1.4 :

- les « modes » sont tels qu'il existe clairement une condition plus fréquente que les autres, pour laquelle se produisent la majorité des accidents de la classe,
- les « occurrences » correspondent à des configurations possibles, sans prépondérance.

Scénarios	Modes			Occurrences						
	Conditions atmosphériques	Éclairement	État route	En agglomération	Hors agglomération	Piéton traverse	Piéton longe la voie	Piéton immobile	Passage piéton	Masques
1	Normales	Jour	Normale (mouillée)	x		x				x
2a	Normales (pluie)	Nuit	Normale (mouillée)	x		x				
2b					x					
3	Normales	Jour	Normale	x		x			x	
4a	Dégradées	Nuit	Normale (mouillée)	x			x			
4b					x					
5	Non significatif			x	x	x	x	x	x	x
6	Non significatif			x		x	x		x	
7	Non significatif			x	x	x	x		x	x
8a	Dégradées	Jour	Glissante	x		x	x	x		
8b					x					
9	Non significatif			x	x	x		x	x	x
10	Normales	Nuit	Normale (mouillée)		x	x				
11	Normales Pluie	Nuit	Normale (mouillée)	x	x			x	x	

TAB. 1.4 – Accidents véhicule-piéton : modes et occurrences.

Ces résultats apportent des contraintes supplémentaires sur le système de détection de piétons pour la prédiction de chocs véhicule-piéton :

condition d'éclairement : un grand nombre d'accidents se déroulant en conditions d'éclairement nocturne, le système de détection doit fonctionner de jour et de nuit,

condition de la route : la route est souvent mouillée, ce qui réduit les performances et les capacités dynamiques des véhicules. L'eau sur la route perturbe certains systèmes de détection de piétons,

résistance à l'environnement visuel : la majorité des accidents de piéton a lieu en agglomération où l'environnement est plus complexe qu'en rase campagne. Les fausses détections, telles la confusion entre les piétons et des obstacles aux formes similaires : arbres, panneaux, poteaux... doivent être contrôlées.

1.4.3.4 Conséquences de l'alcoolémie et de l'usage des stupéfiants

Le rôle de l'alcool et des stupéfiants n'est pas négligeable. Le tableau 1.5 montre que, dans un peu plus de 40% des cas, le piéton et/ou le conducteur a consommé de l'alcool ou des stupéfiants avant l'accident (dans 57,3% des accidents, le piéton et le conducteur n'ont consommé ni alcool ni stupéfiants avant l'impact).

Piéton \ Conducteur	Alcool	Sans	Stupéfiants	Total piétons
Alcool	1%	28,6%	1%	30,7%
Sans	5,7%	57,3%	2,6%	65,6%
Stupéfiants	0%	3,6%	0%	3,6%
Total conducteurs	6,8%	89,6%	3,6%	

TAB. 1.5 – Alcool, stupéfiants chez le piéton et chez le conducteur impliqués (PVM).

Les résultats confirment le rôle de l'alcool chez les piétons accidentés, comme cela a été présenté au § 1.3.1.

1.4.3.5 Niveaux de priorité associés aux scénarios-types

Étant donnée la problématique de détection de piétons pour la prédiction de chocs V-P à l'avant du véhicule, l'importance statistique et la gravité des classes d'accidents, trois niveaux de priorité peuvent être attribués aux onze classes d'accidents V-P :

1. Priorité 1 : ceux qui correspondent aux cas les plus génériques et les plus répandus : 1, 2, 3, 4, 8 et 10. Ces scénarios constituent un peu plus de 70% des cas d'après les données INRETS et PVM. Le même système de détection frontale de piétons sera efficace pour l'ensemble des accidents de ces classes. Cela conforte et justifie l'intérêt d'un tel système.
2. Priorité 2, avec deux scénarios : 5 et 11, qui constituent entre 10 et 15% des cas. Ces scénarios nécessitent des moyens de détection différents de ceux mis en œuvre pour les cas de priorité 1 (5 nécessite un capteur détectant les piétons à l'arrière du véhicule, 11 requiert un système qui détecte les personnes allongées, assises, ou accroupies sur la route). Au sein de ce groupe, le scénario-type 11 semble plus prioritaire que le 5, puisque la gravité des accidents y est plus importante.
3. Enfin, les scénarios de priorité 3 (6, 7 et 9) sont liés à des types particuliers de véhicules et leur poids statistique est faible (moins de 8%).

1.4.3.6 Taux de recouvrement

Le taux de recouvrement de la classification en scénarios-types, pour l'ensemble des accidents mortels de piéton en France, est le rapport du nombre d'accidents qui peuvent être affectés à une classe sur le nombre total d'accidents V-P. Ce taux permet d'estimer dans quelle mesure cette classification des accidents est représentative des cas réels. Chaque accident est affecté à l'une des classes (A) ou ne l'est pas (\bar{A}). La probabilité pour un accident mortel véhicule-piéton d'être affecté à un scénario, $p(A)$, est égale au taux de recouvrement [23].

La « population totale » est l'ensemble des accidents mortels véhicule-piéton sur une année en France d'effectif N . L'échantillon des $n = 96$ cas est assimilé au résultat d'un tirage sans remise dans la population totale ($N \approx 850$ en 2001 et 2002).

Le nombre x d'accidents vérifiant A au sein de l'échantillon de n individus est obtenu grâce à la loi hypergéométrique. Sur les 96 cas ayant servi aux PVM, 89 ont été affectés à l'une des onze classes de scénarios-types, tableau 1.3. Le taux de recouvrement vaut $x/n = 92.7\%$ pour cet échantillon. Le taux de sondage vaut $n/N = 11\%$, ce qui ne permet pas d'approcher la loi hypergéométrique par une loi binomiale. Grâce au théorème central limite, la proportion d'accidents d'un échantillon peut être approchée par une loi normale d'espérance $p = p(A)$ (taux de recouvrement dans la population totale), et d'écart type [23] :

$$\sigma = \frac{p(1-p)}{n} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}. \quad (1.1)$$

Le taux de recouvrement de la population totale des accidents de piétons mortels sur un an en France est estimé à 92,7% avec un intervalle de confiance à 95% de [88%, 98%].

En se restreignant aux classes de priorité 1, la fréquence de ces accidents est légèrement supérieure à 70% pour les 96 cas étudiés. L'estimation du taux de recouvrement des scénarios-types de priorité 1 est estimé à 70%, avec un intervalle de confiance à 90% de [63%, 77%].

1.4.4 Comparaison avec d'autres travaux

La validité de la classification en onze scénarios-types est testée par une comparaison avec les résultats présentés dans certaines études. Le critère employé est le taux de couverture des onze scénarios-types obtenus et des classes de scénarios de priorité 1.

La comparaison est effectuée avec les autres études françaises (CEESAR et INRETS MA) et avec des données d'accidents de piétons américains traités avec l'outil PBCAT.

1.4.4.1 Accidents en France

Les résultats obtenus avec les PVM ont été comparés aux résultats de la classification des accidents réalisée par l'INRETS, ainsi qu'aux EDA qui ont été affectés à une des onze classes de scénarios-types. Les résultats présentés tableau 1.6 confirment l'importance des trois premiers scénarios. Pour l'étude INRETS, les classes 9 à 11 sont vides, faute d'informations sur les accidents non classés dans l'échantillon obtenu.

L'INRETS a publié en 2003 une mise à jour sur la classification en scénarios-types des accidents de piétons, dont un résumé est donné en annexe D [60]. Les résultats qui y sont présentés sont cohérents avec ceux de cette thèse.

Source	Nombre de cas	Classés	Classes significatives	Classes vides
INRETS	94	81	1, 2, 3.	9, 10, 11.
CEESAR Amiens	26	25	1, 2, 3.	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.
PVM	96	89	1, 2, 3, 4, 8, 10.	6.

TAB. 1.6 – Bilan de la classification pour les trois sources d'accidents en France.

1.4.4.2 Accidents de piétons aux États-Unis

Le pourcentage d'accidents classables avec la base de onze scénarios et de priorité 1 dépasse les 80% pour les accidents sur les artères à Orlando [41].

Sur des données accidentologiques dans six États, la Californie, la Floride, le Maryland, le Minnesota, la Caroline du Nord et l'Utah [18], la correspondance entre la base de scénarios constituée et la typologie NHTSA n'est pas bijective. Certains des onze scénarios-types n'ont pas d'équivalent dans l'étude américaine (6 : porte de camion et 9 : poids lourds). De même, certains types d'accidents américains n'ont pas d'équivalent recensé dans la base proposée dans cette thèse : véhicule sans conducteur, handicapés, vendeur de glace ambulant... D'autres, comme « piéton marche dans sens trafic, heurté par devant », doivent être combinés avec d'autres variantes pour constituer le scénario 4.

Figure 1.5, près de 82% des accidents américains étudiés sont décrits par les onze scénarios-types. Les accidents appartenant aux scénarios-types de priorité 1 forment un peu plus de 71% du total.

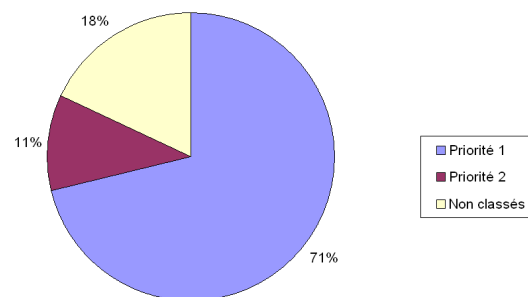


FIG. 1.5 – Partition des accidents tests aux États-Unis.

D'autres données sur les accidents de piétons, synthétisées en annexe D, ont été proposées par la NHTSA dans [61]. Ces résultats sont cohérents et non redondants avec la contribution de ce chapitre. Les taux de recouvrement sont satisfaisants (80% dans les deux cas).

Les scénarios définis dans cette thèse sont représentatifs de l'ensemble des accidents de piétons recensés en France et aux États-Unis. La hiérarchisation des scénarios définie est valide sur l'ensemble des données de test.

1.5 Bilan de l'accidentologie piéton

Après une introduction aux principes de l'accidentologie et une description des méthodologies en vigueur, l'état de l'art sur les accidents V-P a été présenté et analysé.

Les informations issues des publications antérieures à 2003 n'étaient pas suffisantes. La représentativité, l'importance statistique, la gravité et le déroulement cinématique des accidents manquaient de fiabilité. Le nombre de cas traités était faible ou ne concernait qu'un type d'accidents, très localisés géographiquement. L'examen de 96 PVM a permis de compléter et

de rafraîchir la base scénarios-types et d'en obtenir onze, dont certains présentant des variantes détaillées. Des informations détaillées sur les différentes classes d'accidents, aussi bien sur le piéton, le conducteur, la route, l'environnement, que la cinématique du scénario-type d'accident et son importance statistique, ont ainsi été collectées. Cela permet de comprendre le déroulement d'un accident de manière objective et quantifiée.

La comparaison avec d'autres travaux de recherche, français et américains, confirme la représentativité de la base consolidée de scénarios-types. Le taux de couverture obtenu s'avère satisfaisant. La priorité 1 a été attribuée aux scénarios les plus importants. L'intérêt de proposer un système qui pourra réduire le nombre d'accidents véhicule-piéton à l'avant du véhicule est confirmé.

La connaissance détaillée du déroulement des accidents véhicule-piéton les plus significatifs sera également utile pour la modélisation du comportement des piétons au chapitre suivant.

La base de scénarios-types obtenue permettra de choisir les situations de test à considérer lors de l'évaluation et de la validation d'un système embarqué de détection de piétons pour la prédiction de chocs véhicule-piéton, au chapitre 4.

Chapitre 2

Modélisation du comportement piéton

2.1 Introduction

2.1.1 Prédiction de trajectoires de piétons

Le but de cette thèse est d'étudier la faisabilité d'un système de prédiction de chocs véhicule-piéton (V-P). Comme indiqué au § 3, un tel système doit être en mesure de prédire un choc quelques instants avant sa réalisation effective. Ce système de prédiction de chocs comporte notamment un module de prédiction de trajectoire de piéton. Pour générer des trajectoires de piétons, un modèle de comportement de piéton est requis.

Le module de prédiction de trajectoire de piéton reçoit en entrée des informations en provenance d'un système de détection de piétons et d'estimation de leurs caractéristiques physiques et cinématiques. Il s'agit, typiquement :

- de sa position et de sa vitesse relative,
- éventuellement, de son orientation par rapport au véhicule, de sa taille. . .

La phase précédant l'impact a déjà été étudiée dans le chapitre 1. Les résultats issus de l'accidentologie montrent que le comportement du piéton et ses actions sont très importants et décisifs lors d'un accident V-P. Cependant, dans ce domaine, les données disponibles sur le comportement du piéton restent pauvres, à la fois parce que, dans la majorité des cas, c'est le conducteur du véhicule qui est « juridiquement » en tort et parce qu'il reste souvent peu d'indices mesurables sur le comportement exact du piéton.

Heureusement, il n'y a pas d'accident chaque fois qu'un piéton se trouve à proximité d'un véhicule. Cela signifie qu'en temps normal, dans la majorité des cas, le comportement du piéton, celui du conducteur, et leurs interactions sont adaptés à la situation et au contexte. Figure 2.1 c, le niveau de risque ne franchit jamais de seuil critique. Le piéton et le conducteur respectent certaines règles et agissent de façon à ne pas prendre de risque et à ne pas être à l'origine d'un accident.

Il arrive également que le piéton se trouve initialement dans une situation à risque, mais qu'une réaction adaptée lui permette de s'en sortir sans encombres, en modifiant sa trajectoire, ou encore en étant détecté par le conducteur, comme sur la figure 2.1 b. Ces cas forment une grande partie des cas rencontrés dans la réalité. La proportion exacte dépend de la définition du seuil de danger.

Lors des situations sans accident, le système de prédiction ne doit pas se déclencher de

façon intempestive. Le système doit être robuste aux situations limites, potentiellement accidentogènes mais qui ne finissent pas par un choc (figure 2.1 b). Enfin, les situations qui se terminent par un accident V-P restent des cas exceptionnels (figure 2.1 a). Statistiquement, la probabilité pour un piéton d'être impliqué dans un accident V-P est faible : en 2003, en France, la probabilité pour une personne d'être impliquée dans un accident V-P est inférieure à 0,024%. Pourtant identifier et reconnaître de telles situations, dont la probabilité est très faible, s'impose.

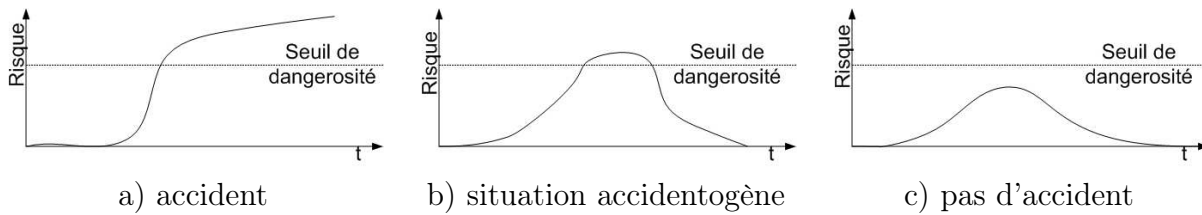


FIG. 2.1 – Évolution du risque de choc en fonction du temps pour trois situations

2.1.2 Simulation de trajectoires de piétons

Avant d'étudier la prédictibilité d'un accident véhicule-piéton, il est nécessaire de bien connaître les trajectoires respectives d'un véhicule et d'un piéton. Pour des raisons évidentes, il n'est pas possible d'essayer et de valider un système de prédiction de chocs V-P en conditions réelles. Le recours aux simulations est indispensable.

Chez Renault, le modèle de dynamique véhicule MADA, ainsi que les simulateurs de conduite Scanner et Ultimate illustrent bien le niveau de connaissances sur les trajectoires de véhicules [62–64].

Néanmoins, pour le piéton, connaître l'état de l'art est moins évident. Les améliorations technologiques ouvrent de nouvelles possibilités autour du piéton en recherche automobile. De plus, le piéton et sa trajectoire font l'objet d'études variées, en fonction des besoins de leurs auteurs. Parmi les grands domaines concernés par les piétons :

- la sécurité routière,
- l'industrie automobile,
- l'urbanisme (conception des voies de transport, interconnexions [65]),
- l'architecture et le génie civil (conception de centres commerciaux, de parcs à thèmes...),
- la sécurité (plans d'évacuation dans un navire [66], dans un stade...),
- la médecine, la biomécanique,
- la médecine du sport,
- les jeux vidéos,
- l'assistance aux personnes handicapées,
- l'aide à la navigation...

2.1.3 Organisation du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de fournir une connaissance satisfaisante et exploitable sur le comportement des piétons. Les points suivants seront traités :

§ 2.2 : Une synthèse des observations sur les piétons, mais aussi des formalisations et modélisations de leur comportement, sont réalisées. Un modèle probabiliste proche des besoins est notamment analysé au §2.2.4.

§ 2.3 : Un modèle de trajectoires de piéton, reposant sur quatre états discrets, est proposé.

§ 2.4 : Le modèle présenté § 2.3 est évalué, des exemples d'utilisation sont donnés.

§ 2.5 : Ce chapitre est conclu par un bilan sur la modélisation du comportement des piétons et sur les perspectives d'application du modèle à quatre états.

Ce modèle de comportement de piétons sera essentiel pour la prédiction de chocs véhicule-piéton présentée au chapitre 3.

2.2 Synthèse des travaux sur les piétons

Un piéton est une personne qui se déplace à pied. Ce mode de déplacement est le plus utilisé, parfois en tant que phase de transition [27].

Dans cette thèse, les piétons qui présentent un intérêt sont ceux qui se trouvent au voisinage de véhicules et plus particulièrement ceux qui interagissent avec eux.

La revue de l'existant révèle que le comportement des piétons et leurs conduites peuvent être observés, analysés et modélisés selon plusieurs niveaux et échelles [67,68].

2.2.1 Classification des travaux de recherche sur les piétons

Dans sa thèse portant sur l'acquisition par traitement d'images et la modélisation de mouvements de piétons, Teknomo propose une classification des travaux disponibles fin 2001 sur l'étude et la modélisation de piétons [68]. Une synthèse est présentée figure 2.2.

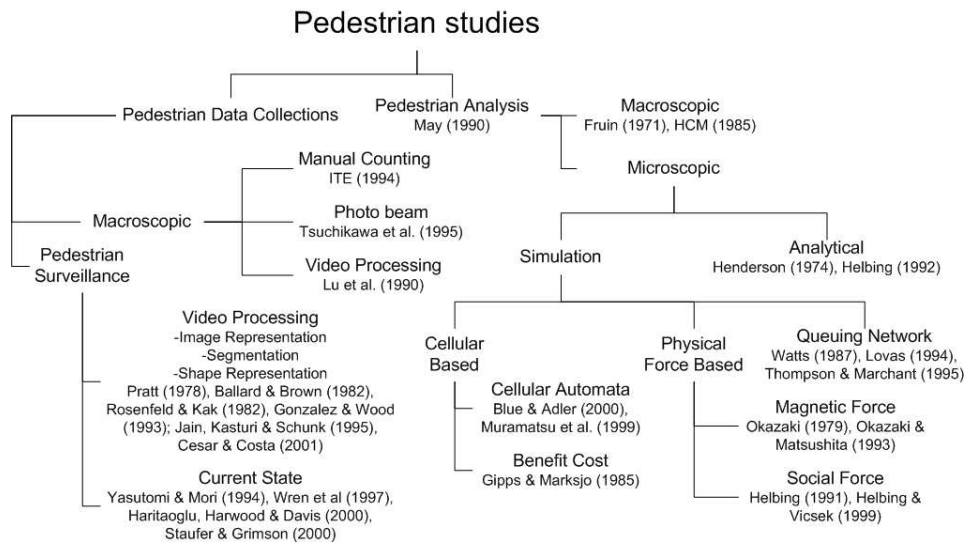


FIG. 2.2 – Classification des modèles de piétons [68].

2.2.1.1 Collecte et analyse des données

Teknomo établit une première distinction, comme l'illustre la figure 2.2 entre la collecte d'informations sur les piétons (data collection) et sur les tentatives d'analyse des comportements des piétons (analysis) [68]. La modélisation et la simulation du comportement des piétons figurent dans la partie analyse. Mais ces deux catégories ne sont pas disjointes, puisque certains paramètres utilisés dans les modèles peuvent être obtenus à partir d'études descriptives.

L'origine des informations sur les piétons est variée :

- Certaines consistent en de simples observations sur certaines situations de la vie courante.
- Un autre mode d'observation des piétons consiste à réaliser des mesures (automatisées ou manuelles), en conditions réelles, par exemple, sur passage protégé avec feux, ou dans une configuration plus particulière, dans un hall, sur un terrain de sport... de caractéristiques physiques des piétons [69]. La trajectoire empruntée, la vitesse, l'accélération ou une analyse détaillée de la démarche ou de la foulée, ont fait l'objet de plusieurs travaux, souvent par des spécialistes en médecine sportive, parfois pour de l'animation d'humanoïdes de synthèse (cinéma, jeux vidéo...). Ces études sont effectuées « en direct », ou en différé sur un enregistrement vidéo des scènes [32, 70–72]. Dans ce dernier cas, les informations sont plutôt de nature quantitative.
- Enfin, pour essayer de comprendre le comportement des piétons, des sondages et autres études orientées vers la psychologie et la sociologie, ayant pour objet l'analyse des relations entre piétons [70], sont menées pour comprendre le comportement des piétons et leur perception du risque [73]... Les informations sont alors qualitatives.

2.2.1.2 Piéton : individu isolé ou membre d'un groupe ?

Teknomo opère également une séparation entre les études sur les piétons de type « macroscopique » et celles qui s'orientent vers une approche « microscopique » [68]. Selon ses termes,

- l'approche macroscopique consiste à agréger les mouvements des piétons et à s'intéresser à des flux de déplacement, à une foule de piétons. Ces mouvements peuvent être décrits par des équations analogues à celles de la mécanique des fluides [74],
- au niveau microscopique, chaque piéton est considéré comme un individu et traité comme une entité à part entière.

La frontière entre modèles « microscopiques » et « macroscopiques » est perméable. Avec quelques adaptations, la majorité des modèles microscopiques permet de reproduire de façon indirecte, mais réaliste, les comportements de foules de piétons [75]. Le comportement de la foule résulte alors de l'émergence de caractéristiques propres aux individus.

Certains chercheurs introduisent même un niveau intermédiaire qualifié de « mésoscopique ». Ceci donne trois niveaux visibles sur la figure 2.3 [74, 76]. L'approche mésoscopique consiste à ne pas traiter tous les piétons comme faisant partie d'un seul flux, mais à agréger les piétons en groupes homogènes puis à les traiter.

Dans le cadre de ce chapitre, ce sont essentiellement les résultats sur le comportement « microscopique » qui retiennent l'attention. En effet, la majorité des accidents véhicules piétons (plus de 95%) n'impliquent qu'un seul piéton à la fois [77]. Même si, dans certains cas, le piéton était dans un groupe avant la réalisation du choc, son comportement juste avant

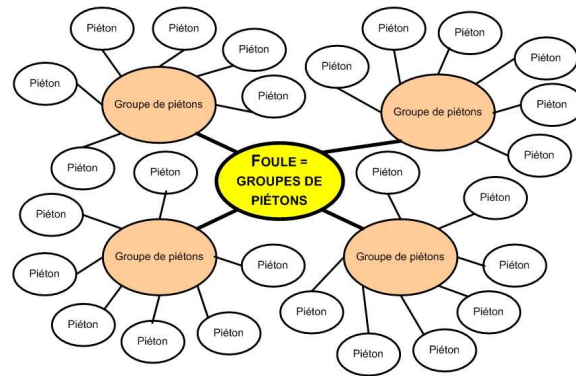


FIG. 2.3 – Les trois échelles d’observation des piétons en groupe. À l’échelle macroscopique, les recherches s’intéressent aux foules, l’échelle mésoscopique à de petits groupes homogènes. L’échelle microscopique concerne le comportement du piéton en tant qu’individu.

l’impact relève du niveau microscopique. C’est le comportement de l’individu impliqué dans l’accident qui est à l’origine du choc.

2.2.1.3 Modélisation à plusieurs échelles

En fonction du nombre de piétons traités, plusieurs niveaux (micro, méso, macro) permettent de décrire le comportement du piéton. Les dimensions de la zone observée interviennent également dans la définition du niveau (figure 2.4).

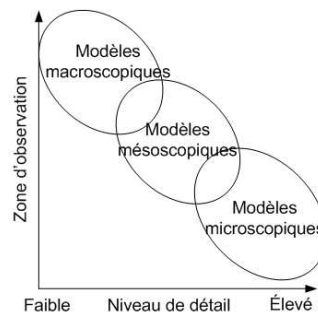


FIG. 2.4 – Relations entre les trois approches de modélisation [74].

Selon ce découpage, le niveau macroscopique se rapporte au comportement des piétons sur une grande zone. Cela signifie que le comportement d’un grand nombre de piétons entre dans le cadre de ces études. Mais cela implique également que les déplacements et activités d’un piéton, considéré comme un individu, sont également couverts par ce niveau macroscopique.

D’un côté, cette approche possède une vertu unificatrice puisqu’elle propose une classification en fonction de deux critères : l’échelle « géographique » et le niveau de détail. De l’autre, ce découpage introduit une ambiguïté avec les définitions des niveaux du § 2.2.1.2.

Hoogendoorn et Bovy ont proposé de découper le processus de déplacement d’un piéton (individu) selon une approche dite « comportementale » (cf. figure 2.5 et [78]). Dans ce cadre, ils considèrent que les activités des piétons (actions, déplacements...) peuvent engendrer des « bénéfices » ou des « coûts ». Pour optimiser son bilan, le piéton agit à trois niveaux :

1. le choix de ses activités et destinations,
2. le choix de sa trajectoire,
3. son comportement de marche.

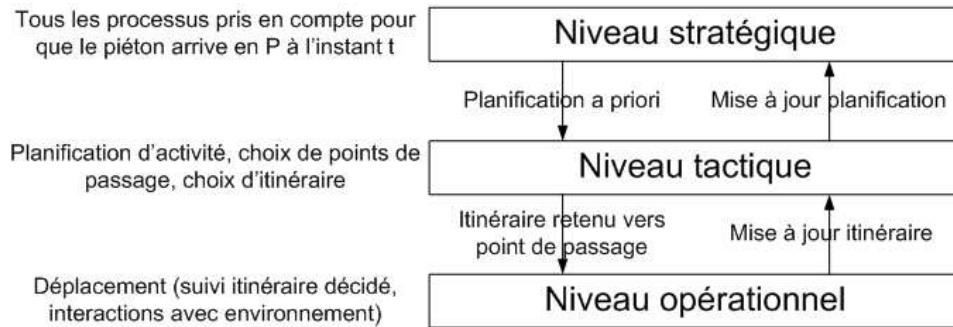


FIG. 2.5 – Décomposition du déplacement d'un piéton selon l'approche comportementale [78].

Le modèle proposé (NOMAD) met en équation le déplacement et l'ensemble des tâches accomplies par le piéton, affecte des coûts à ces activités et optimise la somme totale de ces coûts. Il a été mis à contribution pour simuler les flux des piétons au Schipol Plaza (centre commercial de l'aéroport international d'Amsterdam) lors de fortes affluences.

Ces trois échelles sont parfois assimilées aux niveaux macro, méso et microscopique comme dans [74]. Cela risque de provoquer une confusion puisque ces trois termes servent aussi à qualifier les modèles de groupes de piétons et de foules. Pour éviter toute ambiguïté, les termes macro, méso et micro sont conservés pour le découpage en fonction de la taille des groupes de piéton. Pour qualifier le comportement d'un piéton en fonction de la portée de sa décision (zone à parcourir, horizon et niveau de planification), les termes proposés figure 2.5 : stratégique, tactique et opérationnel, sont employés.

Niveau	Description	Éléments étudiés
Biologique	La marche est le résultat des forces exercées par les muscles du piéton.	Muscles.
Démarche	Résultat de l'activité des muscles : la démarche, le processus de déplacement pas à pas, le maintien d'une position stable.	Position des membres et du corps.
Trajectoire	L'enchaînement des pas conduit une personne, le long de sa trajectoire, à son objectif.	Itinéraire d'un individu.
Foule	Les interférences des personnes entre elles modifient leurs trajets.	Itinéraires d'individus et interactions.

TAB. 2.1 – Typologie comportementale de la marche des piétons [79].

En ajoutant un niveau supplémentaire, dit niveau « biologique » [79], la typologie reproduite dans le tableau 2.1 est obtenue.

En tenant compte du découpage selon les critères « nombre de piétons étudiés » et « portée de ses décisions », les études sur le comportement des piétons peuvent être découpées selon le schéma proposé figure 2.6.

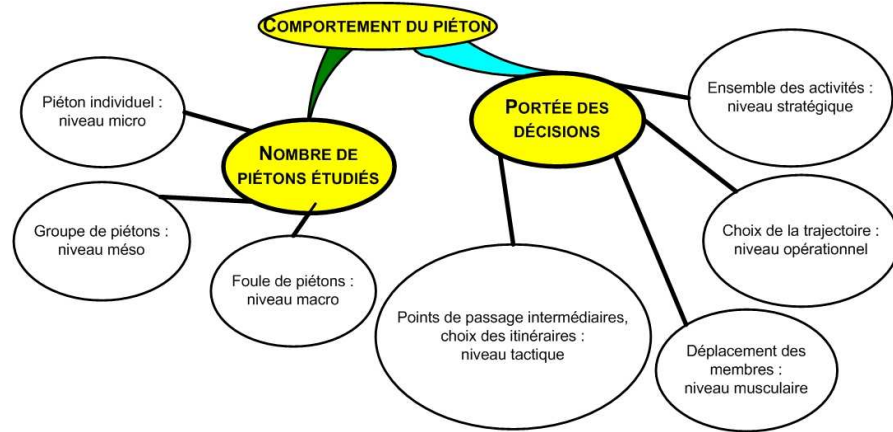


FIG. 2.6 – Niveaux d’analyse du comportement des piétons.

Par rapport aux objectifs, ce sont les modèles et connaissances « microscopiques » et au niveau « opérationnel » qui présentent un réel intérêt et qui méritent d’être développés, car ce sont les connaissances sur les déplacements du piéton pendant quelques secondes qui sont requises.

2.2.2 Observation du comportement des piétons

Les observations et les descriptions sur le comportement des piétons, recensées dans les paragraphes suivants, serviront à l’élaboration de modèles fidèles présentés § 2.2.3 et § 2.3.

2.2.2.1 Interactions avec l’environnement

En temps normal, lors de ses déplacements, que ce soit dans un bâtiment ou à l’extérieur, le piéton fait sans cesse appel à ses sens, et en particulier à la vue, pour s’orienter et adapter sa trajectoire [80]. Un piéton surveille son environnement de façon permanente et naturelle. La zone balayée prend la forme d’une ellipse dont les dimensions s’adaptent aux conditions de trafic et aux obstacles [78].

Pour se déplacer, un piéton requiert un minimum d’espace [78] :

- un pas mesure environ 0,65 m,
- il avance de 2,05 pas/s pour une vitesse moyenne de 1,33 m/s.
- la distance avec le prédécesseur est d’au moins 1 m.

Le besoin d’espace se manifeste pour l’environnement longitudinal du piéton, c’est à dire devant lui, et dans son voisinage latéral. Les piétons qui se déplacent sur un trottoir observent une distance de confort ou de sécurité vis-à-vis [78] :

- des murs et petits obstacles : 0,25 m,
- des maisons et obstacles de plus grandes dimensions : 0,45 m,
- et des routes : 0,35 m.

La distance entre piétons diminue quand la densité augmente. La vitesse, l’espace vital et la longueur des pas diminuent aussi. L’espace vital d’un piéton immobile est de $0,15 \text{ m}^2$, soit une densité maximale de 6,6 piétons immobiles par m^2 . Lorsque la densité de piétons vaut 5,4 piétons par m^2 , il n’y a plus de place pour marcher [78].

L'évitement entre piétons se fait le plus souvent au dernier moment en effectuant un pas latéral. Dans ce cas, les piétons ont tendance à se décaler à droite. Cependant, les piétons semblent réticents à céder le passage unilatéralement à un autre piéton [78]. Lorsque des piétons se retrouvent à proximité, il y a coopération entre eux pour éviter les collisions. Cette coopération prend la forme du protocole suivant :

1. émission de signe critique,
2. reconnaissance et acquittement,
3. interaction.

Un comportement similaire est souvent retrouvé lors des interactions entre piétons et conducteurs de véhicules à moteurs. Toutefois, l'évitement d'obstacle par un écart latéral est beaucoup moins répandu dans ce cas. L'environnement et le contexte de la situation influencent fortement la décision (choix de l'instant et de l'endroit) du piéton de traverser la route [81].

2.2.2.2 Déplacements des piétons

En moyenne, la trajectoire d'un piéton qui traverse la route sur un passage piéton sera plutôt perpendiculaire à la route, alors qu'un piéton qui traverse hors d'un passage piéton aura tendance à arrondir les angles et à prendre la diagonale, comme le montre la figure 2.7.

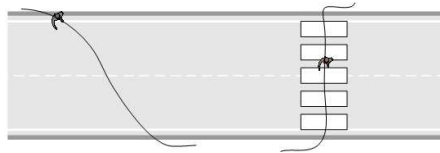


FIG. 2.7 – Trajectoires de piétons traversant une route, hors et sur passage piéton.

Les différentes phases d'une traversée de route sont typiquement :

1. « démarrage » en descendant du trottoir ou au début d'une nouvelle voie, avec augmentation de la vitesse, jusqu'à atteinte de la vitesse voulue,
2. maintien de la vitesse de croisière,
3. éventuellement, avant de traverser une nouvelle voie véhicule : accélération, ralentissement, ou changement de direction doux,
4. « fin de traversée » : léger ralentissement, changement de direction.

Un piéton se déplace en adoptant une des trois allures suivantes : marche, course lente (jogging en anglais) ou course rapide (running en anglais) [82].

Pour piloter son déplacement, le piéton a la possibilité d'agir sur les éléments suivants :

- le piéton marche, « normalement », vers l'avant (déplacement longitudinal). Il joue sur : la longueur des pas, leur cadence et/ou la direction suivie,
- d'autres déplacements sont envisageables : les pas sur le côté, l'arrêt, ou la marche arrière.

2.2.2.3 Statistiques sur la cinématique du piéton

Les résultats des études dans ce domaine manquent d'homogénéité [83,84]. Ceux présentés tableau 2.2 sont issus de travaux de recherche récents, réalisés sur des piétons en situations réelles [85,86]. Ces valeurs numériques donnent de bonnes indications sur les ordres de grandeur, mais ne doivent en aucun cas être considérées comme des références absolues.

Attention du piéton	Temps de réaction (s)	Accélération (G)	Vitesse (m/s)
Normal	$0,84 \pm 0,51$	$0,14 \pm 0,07$	$1,33 \pm 0,24$
Anticipe	$0,77 \pm 0,75$	$0,16 \pm 0,13$	$1,4 \pm 0,25$
Distrain	$1,87 \pm 1$	$0,14 \pm 0,07$	$1,39 \pm 0,25$
Moyenne		$0,14 \pm 0,09$	$1,36 \pm 0,24$

TAB. 2.2 – Données caractéristiques pour une traversée de passage piéton à feu (moyennes et écarts types) [86].

La vitesse d'un piéton dépend [78] :

- de la raison du déplacement, comme le montre le tableau 2.3,
- du sexe du piéton : le tableau 2.4 montre que l'hypothèse *les hommes marchent plus vite que les femmes* est vérifiée,
- de l'âge du piéton,
- de la température,
- de l'heure de la journée,
- de la surface sur laquelle il se déplace, des infrastructures (escaliers, tapis roulants...).

Activité	Vitesse moyenne (m/s)
Changement de mode de déplacement	1,49
Faisant des courses	1,16
Loisir et détente	1,10

TAB. 2.3 – Vitesse des piétons en fonction de leur activité [78].

Population	Vitesse moyenne (m/s)	Écart type (m/s)
Ensemble	1,34	0,26
Hommes	1,41	-
Femmes	1,27	-

TAB. 2.4 – Vitesses moyennes respectives des hommes et des femmes, population allemande [78].

2.2.3 Modèles de comportement de piétons

La partie précédente a présenté les résultats directement issus d'observations sur les comportements des piétons. Après la classification des études sur les piétons réalisée au § 2.2.1, le champ des recherches s'oriente vers les niveaux « microscopique » et « opérationnel ». Cette partie passe en revue des modèles de piétons.

2.2.3.1 Approche « mécanique »

Une modélisation inspirée de la mécanique du point permet d'expliquer les déplacements d'un piéton [87]. L'ensemble des règles est décrit de manière algorithmique.

- La vitesse « cible » est définie : elle est bornée par une vitesse minimale en dessous de laquelle le déplacement est perçu comme ennuyeux et par une limite supérieure correspondant à un déplacement trop inconfortable.
- Les motivations psychologiques du piéton et ses interactions avec son proche environnement sont traduites en termes de forces d'attraction/répulsion [87].
- Les détours, comportements dans une file d'attente, formations de groupes peuvent ainsi être formalisés, rendant les simulations de groupes de piétons possibles.
- L'évitement d'obstacles est traité, mais il ne semble pas transposable aux cas d'accidents véhicules-piétons. Le modèle suppose en effet que les forces de répulsion sont connues par le piéton, ce qui n'est pas le cas pour les accidents de piétons (le danger n'est pas toujours identifié).

Une approche similaire, utilisant des champs de force continus, a débouché sur la génération d'images de piéton articulé, en trois dimensions et en temps réel [88].

Cette approche est appropriée pour simuler des flux de piétons. Cependant, elle nécessite de savoir « ce qui se passe dans la tête du piéton ». Si quelques hypothèses simples sur l'état d'esprit du piéton sont envisageables, telle la conscience ou non de la proximité d'un véhicule, la prise en compte de telles informations est complexe et n'apporte pas d'éléments précis et exploitables. Elle n'est pas utilisable pour prédire de façon fiable la trajectoire d'un piéton en interaction critique avec un véhicule.

2.2.3.2 Automates cellulaires

Les modèles à automates cellulaires tirent leur nom de la discrétisation de l'espace en petites cellules. Chaque cellule possède un ensemble de règles qui régit son état à chaque pas temporel de simulation. Les modèles à automates cellulaires sont caractérisés par quatre propriétés [89] :

1. la dimension de l'espace d'états,
2. le nombre d'attributs définissant l'état par cellule,
3. la définition du voisinage d'une cellule,
4. les règles locales.

Il y a choc lorsque deux objets occupent au même instant au moins la même cellule.

Des automates cellulaires peuvent modéliser le comportement des piétons pour des simulations en milieu urbain ou à l'intérieur de bâtiments [90–93]. Les interactions entre piétons, et notamment entre groupes évoluant selon la même direction, mais dans des sens opposés (deux entrées, deux sorties), ou encore dans un « carrefour piéton » (quatre entrées, quatre sorties) ont été simulées.

D'autres travaux portent sur la simulation de piétons en présence de robots dans une usine [89]. Enfin, tenir compte du fait que les piétons ont tendance à marcher à droite et qu'ils peuvent aussi faire marche arrière permet d'augmenter le réalisme [94].

Aucune approche utilisant les automates cellulaires pour modéliser le comportement des piétons en présence de véhicule à moteur dans une optique de prédiction de chocs véhicule-piéton n'a été publiée. Le niveau et la finesse de la discrétisation de l'espace des positions, mais aussi des temps posent plusieurs inconvénients tels la définition de l'instant de choc, et une recherche de compromis finesse/calculs. Le « saut » instantané d'une cellule à l'autre illustre bien ce problème.

Dans une autre approche, les interactions entre les piétons sont reproduites par un modèle dit à « agents indépendants » [95]. Chaque piéton est modélisé par un « agent » qui se déplace sur une grille [75]. Le découpage de l'espace présente de grandes similarités avec celui des modèles « cellulaires ». Pour des raisons similaires, le modèle semble difficilement applicable à des conflits avec des véhicules, mais la formalisation présente quelques intérêts pour simuler des piétons « intelligents » : choix de direction, perception. La notion de vitesse cible et un ensemble de règles d'interaction avec l'environnement sont également utilisés.

Raisonnement sur une grille à plusieurs échelles permet d'adapter le niveau de finesse à la précision voulue, tout en respectant les contraintes sur le temps de calcul. Mais dans ce cas, l'approche discrète perd son intérêt et l'utilisation d'un modèle continu sur le temps et sur l'espace des positions semble préférable.

2.2.3.3 Modèles « par agents »

« Un agent est une entité située dans un environnement (réel ou abstrait) avec lequel elle interagit. Un agent dispose de capacités cognitives et il est associé à des dispositifs physiques ou logiciels (capteurs, actionneurs, synthétiseur de parole...) qui lui permettent de percevoir et d'agir de sa propre initiative. La simulation multi-agents permet d'étudier des phénomènes émergents comme l'intelligence collective chez les insectes sociaux » [96].

Les agents peuvent être considérés comme une extension des automates cellulaires [76]. Les agents sont libres de se déplacer sur un espace des positions continu, ce qui résout le problème de définition du choc et de l'instant de choc. Les systèmes multi-agents, moins indiqués que les automates cellulaires pour représenter des processus de diffusion (flots de piétons) [76], sont mieux adaptés pour modéliser le comportement de piétons en général, et en particulier pour le besoin de cette thèse.

Le modèle STREETS du Center for Advanced Spatial Analysis, CASA, de l'University College de Londres a été développé en tenant compte de données socio économiques combinées à un système d'informations géographiques [97]. L'application visée est l'étude du comportement des piétons en milieu urbain.

Les agents ont aussi été mis à contribution, par une autre équipe de ce laboratoire, pour l'analyse des mouvements de foule, lors du Carnaval de Notting Hill à Londres [98]. Six types d'agents, animés par des règles différentes ont été définis et leurs comportements simulés.

La finalité de ces approches est d'étudier le comportement macroscopique des piétons, à partir de modèles microscopiques. C'est le réalisme global des modèles qui est requis.

D'une manière générale, modéliser les interactions d'un piéton avec son environnement nécessite de connaître ses motivations, son caractère, ses humeurs, mais aussi ses facultés perceptives et cognitives. Comme pour l'approche « mécanique », présentée au § 2.2.3.1, ce genre d'informations n'est pas accessible à partir d'un système de détection de piétons.

2.2.3.4 Animation de piétons virtuels

Le niveau de détail et d'échelle en animation de piétons virtuels est diamétralement opposé à la modélisation de piétons au niveau stratégique. Le piéton est traité individuellement et le mouvement de ses membres est modélisé. Le piéton est une structure complexe de 41 degrés de liberté dans [99].

L'état de l'art réalisé par Multon dans [100] permet de s'apercevoir rapidement que ce niveau de détail, avec un mouvement réaliste des membres, ou parfois des muscles ou des articulations, est superflu dans le cadre de cette thèse concentrée sur la sécurité primaire..

2.2.3.5 Le piéton pas à pas

D'autres travaux décomposent moins finement les mouvements humains que dans le cas de l'animation de piétons virtuels. Cette fois ce sont les pas des piétons qui sont étudiés [101]. La démarche du piéton fait également l'objet de recherches : le mouvement est décomposé en plusieurs phases, la durée des différents cycles est étudiée [102]. Les spécificités de la foulée des personnes âgées sont étudiées dans [103].

Actuellement, un seul capteur — ALASCA, un télémètre à balayage conçu par IBEO AS en partenariat avec HELLA AG — réalise une détection des jambes des piétons et serait en mesure d'exploiter une telle information [104–106]. Les autres systèmes de détection de piétons se contentent de détecter les piétons et d'estimer leurs positions, sans faire de distinctions plus précises. La modélisation du mouvement des membres inférieurs du piéton est un niveau de détail qui n'est pas exploitable dans l'immédiat.

Le piéton est ainsi considéré comme un objet rigide, pour limiter la puissance de calcul et la taille des mémoires. La connaissance de la position de son centre de gravité est suffisante. Si le nombre de capteurs détectant les jambes de manière fiable augmente, cette décision pourra être remise en cause.

2.2.3.6 Bilan

Le déplacement d'un piéton résulte de trois tâches principales, représentées figure 2.8 :

1. la décision, effectuée par le cerveau,
2. la transmission de l'ordre, réalisée par le système nerveux,
3. la mise en oeuvre de l'ordre, réalisée par les muscles.

À quelques exceptions près (modèle biologique), ces modèles supposent que les deux dernières tâches sont réalisées de manière parfaite et ne s'intéressent qu'à la première (cf. figure 2.8). Pour cela, ces modèles s'appuient sur des variables et des concepts internes au piéton (motivation, objectifs, perception de l'environnement...). Difficilement quantifiables dans le cas général et réel, ces informations sont complètement inaccessibles à partir d'un système de détection de piétons embarqué sur véhicule.

De plus, ces modèles sont *phénoménologiques* (ou de connaissance) au sens de Walter [107]. En effet, les modèles décrits plus haut tentent d'expliquer et d'interpréter le comportement, très complexe, des piétons. Or, avec des modèles *phénoménologiques*, *dès que l'on s'intéresse à un processus un tant soit peu complexe, on peut obtenir une structure de modèles de très*

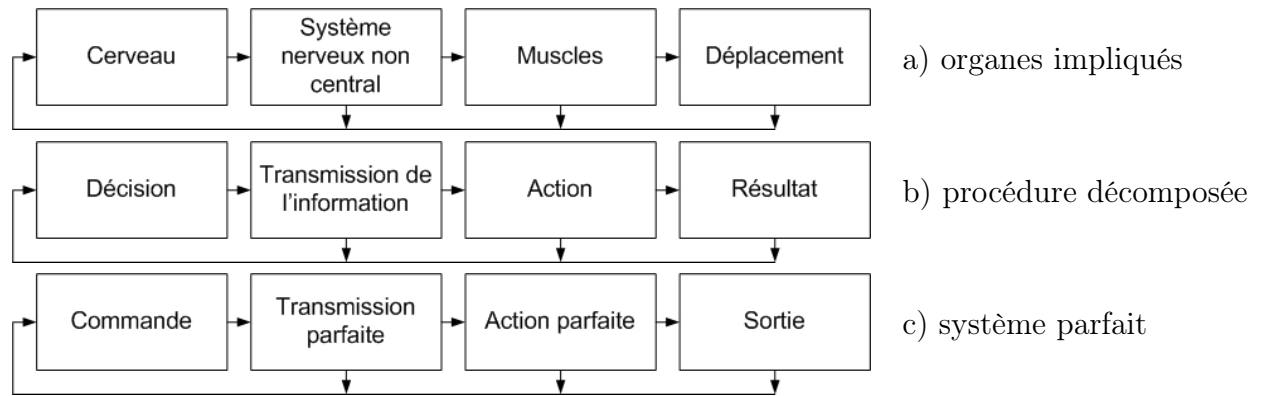


FIG. 2.8 – Décomposition du mouvement du piéton.

grande dimension [...], comportant de nombreuses équations, souvent non linéaires. Les modèles associés sont généralement difficiles à simuler [...]. Ils sont par contre bien adaptés à une simulation détaillée en vue d'une prédiction de comportement à long terme [107].

Dans le cas des piétons, tous les principes qui régissent leurs comportements ne sont pas connus de façon certaine. Le recours à des modèles *phénoménologiques* présente alors moins d'intérêt. Par contre, à partir d'observations sur les piétons, des modèles *comportementaux* peuvent être extraits, qui se bornent à reproduire un comportement observé, sans requérir aucune connaissance *a priori* sur le processus ayant généré les données. Il n'est même pas nécessaire de savoir ce que représente la sortie ni en quelle unité elle est exprimée. La structure du modèle ne prétend en rien correspondre à celle du processus. Ses paramètres ne sont pas clairement reliés au processus étudié [...]. Les modèles comportementaux sont en général simples à simuler, et mieux adaptés à la détermination d'une commande que les modèles phénoménologiques [107].

Ici, le fait de se passer de connaissances *a priori*, signifie que l'on ne fera aucune hypothèse sur le mode de fonctionnement de l'intelligence humaine qui sera à l'origine des ordres qui provoqueront le déplacement du piéton. Il faudra se contenter de choisir un modèle à partir des données disponibles sur les sorties du système uniquement.

L'utilisation de modèles « comportementaux » semble mieux adaptée à la problématique. De Nicolao et al. ont présenté un modèle de piétons qui semble compatible avec les contraintes et besoins de la thèse [108]. Ce modèle de trajectoires de piéton est présenté dans le paragraphe suivant.

2.2.4 Modèle « de Nicolao » : marche aléatoire intégrée

Ce modèle a été développé dans le cadre du projet européen PROTECTOR, dont le thème principal est la sécurité préventive des usagers vulnérables de la route [109]. Cette approche cherche à évaluer le risque lié à une situation de conduite, à partir de données issues de capteurs embarqués qui estiment les états cinématiques du véhicule et des piétons [108].

En cas de situation dangereuse, ce système d'évaluation de risque génère une alerte à partir de trois informations en entrée : la norme de la vitesse du véhicule v , les positions relatives longitudinale x et latérale y du piéton.

Avec ces seules informations, l'évolution du comportement des piétons n'est pas représentable par un processus déterministe. L'utilisation d'une marche aléatoire simple pour modéliser la position du piéton donnerait des trajectoires irrégulières : la vitesse varie de manière désordonnée et discontinue et le mouvement généré serait trop incohérent pour représenter l'évolution d'un piéton. Les auteurs proposent une marche aléatoire « intégrée » : la vitesse du piéton est assimilée à une marche aléatoire et la position est obtenue par intégration de la vitesse. Les auteurs ont constaté que les mouvements générés ainsi sont plus réguliers et plus réalistes.

2.2.4.1 Présentation du modèle

La position du piéton et sa vitesse longitudinales, sont notées, respectivement x et v_x . Leur évolution est donnée par les équations suivantes :

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t \cdot v_x(t), \quad (2.1)$$

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + \Delta t \cdot \omega_x(t), \quad (2.2)$$

$$\omega_x(t) \sim BBG(0, \sigma_{v_x}^2). \quad (2.3)$$

avec BBG un bruit blanc gaussien de moyenne nulle et de variance $\sigma_{v_x}^2$. Les mêmes équations sont valables pour la position et la vitesse latérales, y , v_y . Les processus (x, v_x) et (y, v_y) sont indépendants.

La vitesse et la position initiales sont données par la loi normale ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} x(0) \\ v_x(0) \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} 0 \\ m_{v_x}(0) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{v_x}^2(0) \end{bmatrix} \right). \quad (2.4)$$

où $m_{v_x}(0)$ est la valeur moyenne de la vitesse initiale et $\sigma_{v_x}^2(0)$ sa variance. Les paramètres de ces modèles sont déterminés grâce une nouvelle expérience et à des données américaines de l'AASHTO [110]. Pour la vitesse initiale, les paramètres suivants ont été obtenus :

$$v_x(0) \sim N(1, 295; 0, 273^2), \quad (2.5)$$

selon la direction de propagation initiale du piéton. Cela signifie que ce modèle de piéton privilégie les mouvements ayant lieu essentiellement selon sa direction initiale. Au départ, la composante latérale de la vitesse ($v_y(0)$) est nulle.

Les deux composantes de sa vitesse évoluent selon deux lois gaussiennes de moyennes nulles et de variances :

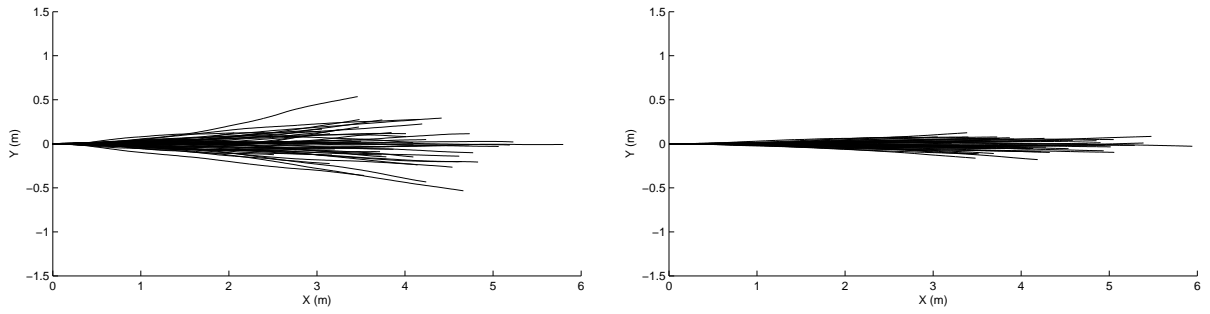
$$\sigma_{v_x}^2 = 0, 82, \quad (2.6)$$

$$\sigma_{v_y}^2 = 0, 5. \quad (2.7)$$

2.2.4.2 Limites de ce modèle

Les trajectoires générées ont été évaluées dans le cadre de cette thèse. Les résultats exploitent un modèle probabiliste pour calculer les évolutions d'un piéton en à partir de certaines propriétés cinématiques. Toutefois, ce modèle ne remplit pas les besoins de cette thèse :

- Avec les valeurs numériques retenues pour les écarts types, le piéton marche en permanence. Les probabilités pour que le piéton s'arrête ou court sont très faibles.
- La forme des trajectoires dépend du pas temporel de simulation. Plus le pas est fin, plus le piéton a tendance à marcher tout droit. La figure 2.9 illustre bien cette dépendance.
- Même pour un pas de temps important (supérieur à 10 ms), ce modèle génère des trajectoires très similaires. Les résultats présentés tableau 2.12 montrent que les trajectoires générées couvrent une partie seulement des cas réels.
- La vitesse semble prendre des valeurs plausibles, mais pas l'accélération. Les composantes longitudinales et latérales de l'accélération sont indépendantes. Chaque composante est nulle en moyenne, mais la norme du vecteur accélération ne l'est pas.



a) durée : 3 s, pas : 10 ms, 50 trajectoires b) durée : 3 s, pas : 1 ms, 50 trajectoires

FIG. 2.9 – Influence du pas temporel sur les trajectoires obtenues par le modèle « de Nicolao ».

2.2.4.3 Proposition d'un modèle « de Nicolao modifié »

Modifier légèrement le modèle « de Nicolao » permet de le rendre moins dépendant du pas de temps et apporte une plus grande disparité entre les trajectoires générées. L'équation 2.2 se réécrit de la façon suivante :

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + \Delta t \cdot \sigma_{v_x} \cdot \eta(t), \quad (2.8)$$

avec

$$\eta(t) \sim BBG(0, 1).$$

Les composantes respectivement aléatoires et déterministes peuvent être séparées et l'équation 2.8 devient :

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + \sigma_{v_x} \cdot \zeta(t), \quad (2.9)$$

où

$$\zeta(t) \sim BBG(0, \Delta t^2). \quad (2.10)$$

Cette expression n'est pas homogène à cause du terme Δt^2 qui, est à l'origine de la dépendance avec le pas de temps. Une forme respectant l'homogénéité est obtenue avec :

$$\zeta(t) \sim BBG(0, \Delta t), \quad (2.11)$$

d'où :

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + \sqrt{\Delta t} \cdot \sigma_{v_x} \cdot \eta(t), \quad (2.12)$$

le modèle modifié est obtenu en remplaçant l'équation 2.2 par :

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + \sqrt{\Delta t} \cdot \omega_x(t). \quad (2.13)$$

Avec le modèle initial, l'écart type sur la position latérale se resserre très fortement lorsque le pas temporel diminue. Avec le modèle modifié, la dépendance au pas temporel de simulation est supprimée, comme le montre la figure 2.10.

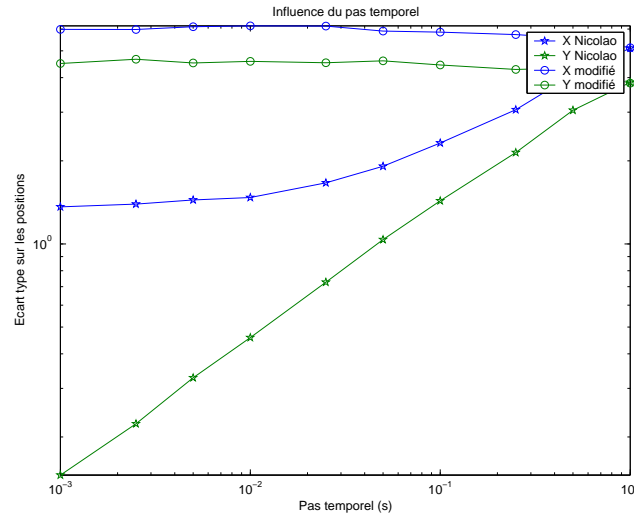


FIG. 2.10 – Sensibilité au pas de temps des modèles « de Nicolao » et « de Nicolao modifié ». Pour calculer les écarts-types, 3 000 trajectoires, de 5 s chacune, ont été générées, pour chaque pas temporel.

Cependant, cette modification introduit des inconvénients : la proportion de trajectoires générées non réalistes ou peu probables est élevée, comme le montre le tableau 2.5.

Pas de simulation (ms) \ Modèle	« de Nicolao »	« de Nicolao modifié »
10	100	86,8
25	100	81,6
50	99,2	83,2
125	97,2	83,2
Meilleur cas	100	86,8

TAB. 2.5 – Réalisme des trajectoires obtenues par les modèles « de Nicolao » et « de Nicolao modifié » : classification de 500 trajectoires de 5 s pour chaque modèle et chaque pas temporel.

Par exemple, le modèle modifié génère des trajectoires de trois secondes au cours desquelles le piéton rebrousse complètement chemin. De telles trajectoires, visibles figure 2.11, peuvent être considérées comme des marches arrières ou en crabe. Cela reviendrait alors à considérer que le piéton se déplace, indifféremment, dans toutes les directions, ce qui n'est pas vrai physiquement.

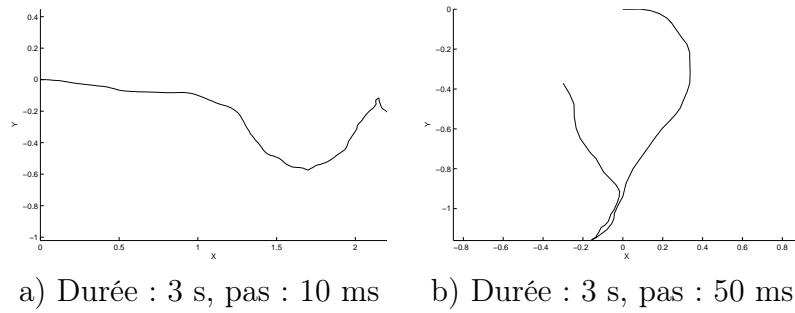


FIG. 2.11 – Exemple de trajectoires aberrantes générées par le modèle « de Nicolao modifié ». Ces trajectoires présentent des points de rebroussement non réalistes à l'échelle des piétons.

Le réalisme des trajectoires générées par les modèles « de Nicolao », original ou modifié, n'est pas suffisant. Le modèle original génère des trajectoires trop semblables les unes aux autres, alors que la modification génère des trajectoires plus disparates, mais souvent non réalistes. Enfin, la nature discrète de ces deux modèles crée une dépendance au pas de temps, ce qui génère des erreurs lors du calcul de la position, résultat de l'intégration numérique de la vitesse.

2.3 Modèle probabiliste de trajectoires de piétons à quatre états

Inspiré du modèle « de Nicolao », un modèle plus réaliste est proposé dans cette partie [111]. Il permet de s'affranchir de la dépendance au pas temporel, tout en générant des trajectoires réalistes, couvrant aussi bien les cas où le piéton est immobile, que ceux où il court. De plus, contrairement au modèle « de Nicolao », le vecteur vitesse évolue de façon plus régulière et n'est plus marqué par son état initial.

Ce modèle a été adapté et utilisé dans le cadre du projet européen CAMELLIA [112]. Des applications sont décrites dans deux brevets [113, 114]. Après un rappel des principales caractéristiques des mouvements des piétons exploitées, le modèle proposé est décrit, puis le choix des paramètres est explicité.

2.3.1 Informations *a priori* sur le comportement des piétons

Les résultats présentés plus haut et quelques observations de bon sens sur lesquels repose le modèle sont recensés dans ce qui suit :

- L'allure du piéton prend un nombre fini d'états S , appartenant à l'ensemble suivant : $\mathcal{S} = \{\text{immobile, marche, court lentement, court vite}\}$.
- À chaque état S correspond un ensemble de vitesses et de changements de direction. Par exemple, dans la rue, un piéton peut facilement se retourner lorsqu'il est immobile ou à faible vitesse, alors que c'est très improbable s'il est en train de courir.
- Les déplacements d'un piéton peuvent être décomposés en une succession de mouvements élémentaires : les pas.

- Lors d'un déplacement, l'allure du piéton évolue lentement par rapport à l'échelle de temps humaine (environ une seconde).
- Un piéton se fixe une destination et adapte sa vitesse et sa direction pour l'atteindre.

2.3.2 Modèle proposé

Le modèle repose sur les principes suivants :

- la trajectoire d'un piéton est décrite en connaissant celle de son centre de gravité ainsi que la direction de son vecteur vitesse,
- un piéton est toujours dans un des quatre états cités plus haut (§ 2.3.1),
- le comportement du piéton est considéré comme une succession de changements d'états,
- une fois dans un des quatre états, le piéton y reste pour une durée minimale,
- à la fin de la durée minimale, le piéton peut rester dans le même état ou en changer,
- en plus de l'état actuel du piéton, l'état « cible » est défini comme l'état dans lequel il sera après la transition actuelle,
- à chaque état cible sont associées une norme de vitesse cible et une direction cible,
- la norme de la vitesse cible du piéton dépend de l'état cible,
- le changement de direction cible dépend également de l'état cible,
- la norme de la vitesse et le changement de direction cibles suivent, respectivement, deux lois indépendantes qui sont des sommes de gaussiennes tronquées,
- l'état d'un piéton évolue selon la chaîne de Markov donnée figure 2.12.

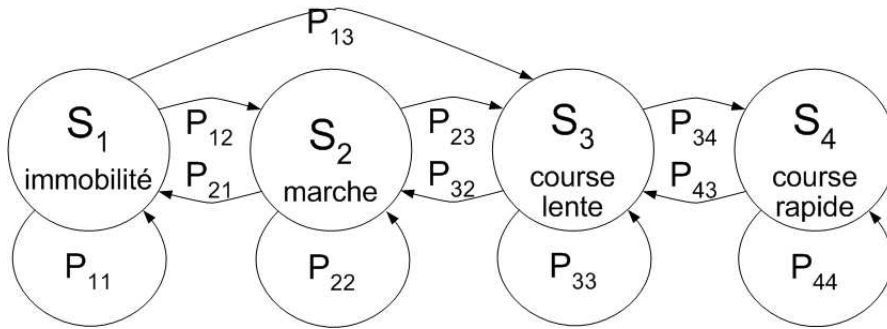


FIG. 2.12 – Diagramme de changement d'état.

L'existence de la probabilité P_{13} montre que le modèle autorise un piéton à passer à l'état « course lente » alors qu'il était immobile à l'instant précédent. Par contre, le passage direct de l'état immobile à l'état « course rapide » n'est pas autorisé : $P_{14} = 0$. La nullité des probabilités P_{31} et P_{41} résulte du fait qu'un piéton ne peut pas s'arrêter net alors qu'il courait. À cause de l'inertie, il doit d'abord ralentir, passer à l'état « marche » et faire quelques pas avant de s'immobiliser.

Ce modèle permet de générer aléatoirement des trajectoires réalistes. Un aperçu de la structure de l'algorithme est donné figure 2.13. Lorsque le moment de changer d'état est venu, la valeur du nouvel état ne dépend que de celle de l'état précédent. Une fois le nouvel état connu, les valeurs cibles de la norme de la vitesse et de la direction sont obtenues aléatoirement.

Ce modèle est déterministe par morceaux, comme le montre l'annexe F. La génération de données aléatoires est isolable des calculs pas à pas sur les grandeurs déterministes. Cette

```

t = t_début
Tant que t < horizon_prédiction
  Début de la génération à l'instant t,
    Si drapeau_changement_état == 1
      Tirer nouvel état S'
      Chercher durée_changement_état
      Tirer vitesse_cible
      Calculer variation_vitesse
      Tirer changement_direction
      Calculer variation_direction
    Fin
  Mise à jour drapeau_changement_état
  Mise à jour vecteur_position
  Mise à jour norme_vitesse
  Mise à jour direction
Fin

```

FIG. 2.13 – Algorithme de génération de trajectoires de piétons.

propriété apparaît dans la figure 2.13 dans laquelle les opérations de « mise à jour » sont déterministes.

Un exemple de génération de trajectoire de piéton à partir de l'instant T_i , où se produit un changement d'état, est donné. Les instants où le piéton change d'état sont notés T_k et sont appelés « instants piéton ».

- Ses vecteurs position et vitesse actuelles, respectivement $\mathbf{p}(T_i)$ et $\mathbf{v}(T_i)$, sont connus.
- L'état actuel $S_i = S(T_i)$ est également connu.
- L'état suivant, ou état cible, $S^+(i) = S_{i+1}$ est obtenu par un tirage aléatoire.
- La durée de la transition $T_{S_i \rightarrow S_{i+1}}$ permet de connaître T_{i+1} .
- La norme de la vitesse cible, notée $v(T_{i+1})$, ainsi que le changement d'angle entre T_i et T_{i+1} , noté $d\alpha_{T_i T_{i+1}}$, sont obtenus de manière aléatoire.

Entre T_i et T_{i+1} , à partir du moment où T_i , T_{i+1} , $\mathbf{p}(T_i)$, $\mathbf{v}(T_i)$ et $\mathbf{v}(T_{i+1})$ sont connus, la trajectoire est déterministe. De plus, elle se calcule de manière analytique en n'importe quel point du segment $[T_i, T_{i+1}]$ (cf. annexe F).

Ce caractère déterministe par morceaux apporte à ce modèle un avantage par rapport à des modèles complètement aléatoires et à temps discret, comme le modèle « de Nicolao » [108].

Dans le cas de tels modèles, une fois le pas temporel de simulation fixé, il est difficile d'en changer. Modifier le pas entraînera une modification des propriétés statistiques des trajectoires, à cause de l'intégration numérique de la vitesse sur le temps. Ces erreurs peuvent s'accumuler, surtout lorsque le pas de temps est grand. Réduire le pas de temps limite ces erreurs. Mais, lorsque le pas de temps est fin, la vitesse varie en permanence, à une fréquence élevée, sans aucune signification physique.

Avec le modèle proposé dans cette thèse, le pas de simulation temporel s'adapte en fonction du besoin, sans contrepartie sur les propriétés des trajectoires qui sont indépendantes du pas de simulation.

Les instants piétons sont séparés par des temps de transition qui sont à l'échelle du temps piéton. Cette échelle est supérieure au pas temporel de 10 ms utilisé lors de simulations ayant

pour but d'estimer un temps avant impact pour une application automobile. Ceci sera mis à contribution dans le chapitre suivant pour réduire la charge de calcul (cf. § 3.5.2.3).

2.3.3 Propriétés du vecteur vitesse

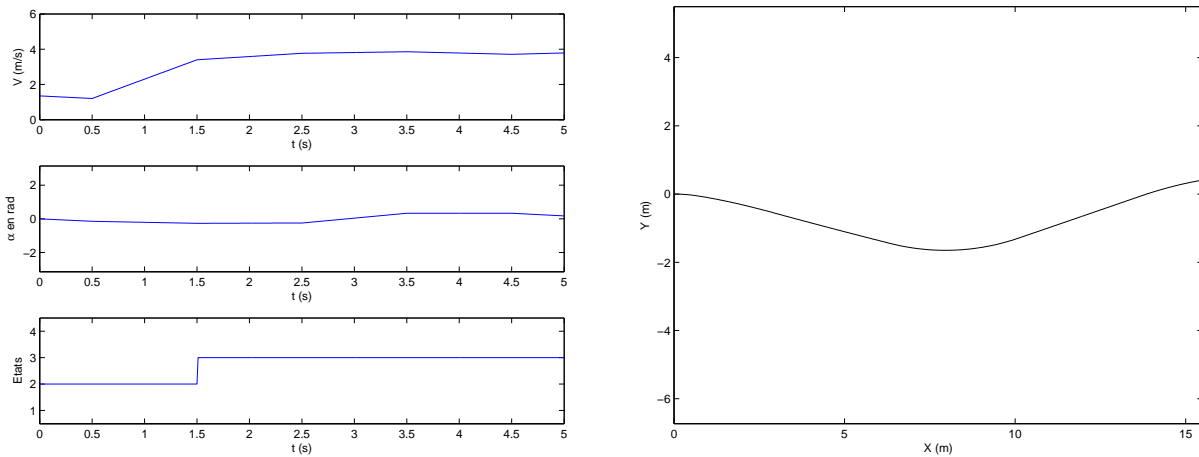
Les contraintes exercées par l'environnement empêchent les piétons qui se déplacent dans la rue de conserver exactement le même vecteur vitesse pendant plusieurs secondes.

Pour éviter que ce modèle aléatoire ne génère des trajectoires trop prévisibles, le vecteur vitesse du piéton fluctue, même lorsque l'état reste le même. Un nouveau vecteur vitesse cible est obtenu aléatoirement lors du tirage du nouvel état cible. Ces légères variations du vecteur vitesse permettent d'augmenter la couverture des cas réels.

Dans le modèle « de Nicolao », la vitesse est décrite directement par ses deux composantes vectorielles orthogonales et indépendantes entre elles [108]. L'indépendance de ces deux variables, ainsi que la polarisation par rapport à la direction initiale du piéton affectent le réalisme du modèle « de Nicolao ».

Le modèle proposé utilise la décomposition en « coordonnées cylindriques », avec v , norme du vecteur vitesse d'une part et θ , sa direction, d'autre part.

Pour simplifier le problème, la direction θ de la vitesse, est égale à l'orientation α du piéton. Cela revient à considérer que le piéton marche droit devant lui, qu'il n'y a pas de marche à reculons, ni de pas latéraux. Ces deux mouvements ne sont pas définis explicitement, mais ils pourront néanmoins être obtenus de manière indirecte, avec une probabilité faible mais compatible avec les données sur les accidents V-P.



a) évolutions de la norme et de la direction de la vitesse et des états en fonction du temps b) trajectoire générée, dans le plan

FIG. 2.14 – Modèle à quatre états : continuité de la vitesse avec le temps.

Le modèle « de Nicolao » génère des trajectoires de piétons dont la vitesse suit, à chaque pas de temps de simulation, une loi gaussienne. Cette vitesse évolue brusquement et est irrégulière, ce qui n'est pas réaliste.

Le modèle proposé génère des trajectoires dont le vecteur vitesse évolue de façon continue au cours du temps. Sa norme et sa direction sont des fonctions continues et affines par morceaux. La figure 2.14 donne l'évolution des composantes de la vitesse pour une trajectoire.

2.3.4 Choix des paramètres

La structure du modèle a été présentée plus haut. Dans ce paragraphe, ce sont les paramètres du modèle qui sont explicités. À chaque état sont associées des valeurs décrivant :

- la distribution des normes du vecteur vitesse,
- la distribution des changements de direction du vecteur vitesse.

Pour chaque changement d'état, les informations suivantes sont requises :

- la probabilité de passage d'une allure à l'autre,
- la durée de transition,
- la distribution des normes du vecteur vitesse,
- la distribution des changements de direction du vecteur vitesse.

En principe, ces informations pourraient être obtenues grâce à une campagne de mesures de trajectoires de piétons réels. Une campagne à grande échelle n'ayant pas été réalisée, les paramètres présentés dans ce qui suit sont issus de l'état de l'art ou obtenus empiriquement par l'observation et l'analyse de comportements réels et de simulations.

Pour réduire le nombre de paramètres, certaines distributions de normes et de changements de direction du vecteur vitesse ne dépendent que de l'état cible. Le changement de direction est obtenu en deux étapes : un changement de direction principal est d'abord tiré aléatoirement, puis le changement de direction effectif est tiré aléatoirement autour du changement de direction principal.

État S	Vitesse moyenne	Écart type	Vitesse minimale	Vitesse maximale
Immobile	0	0,04	0	0,15
Marche	1,4	0,25	0,7	2,1
Course lente	3,5	0,4	2,5	4,5
Course rapide	6	0,5	5	8

TAB. 2.6 – États du piéton et intervalles de vitesse. L'unité employée est le m/s, les données sont une synthèse issue de [69, 83, 84, 86, 115].

Une fois le nouvel état connu, la norme de la vitesse est tirée aléatoirement selon une loi gaussienne dont la moyenne et l'écart type sont données dans le tableau 2.6, en imposant une contrainte supplémentaire avec les vitesses limites.

Le changement de direction du piéton suit un processus aléatoire, comparable à celui qui régit la norme de la vitesse. Il est considéré discret au premier ordre. Des changements de direction principaux peuvent être définis. L'orientation du piéton est donnée par l'angle $\alpha(T_n)$. Le changement est de $d\alpha_{T_n \rightarrow T_{n+1}}$ alors qu'il passe de S_n à l'état S_{n+1} .

Dans [71], le piéton marche vers une des douze directions arbitraires, sans d'autre explication que la nécessité de limiter le nombre de directions. Plusieurs cas ont été testés, et le choix de huit directions principales, réparties régulièrement sur le cercle trigonométrique, figure 2.15, apparaît comme étant suffisant.

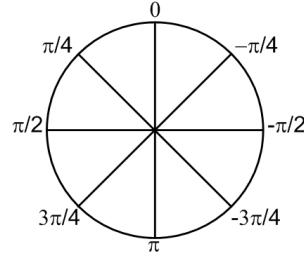


FIG. 2.15 – Les huit principaux changements de direction.

Le piéton tend à se déporter à droite lorsqu'il rencontre des obstacles ou d'autres piétons sur sa trajectoire [78]. La probabilité d'opter pour la droite plutôt que pour la gauche n'étant pas connue, ce comportement ne sera pas intégré et aucun côté ne sera privilégié.

Valeur absolue des changements de direction (rad)	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
Immobile	0,7	0,2	0,07	0,02	0,01
Marche	0,75	0,2	0,05	0	0
Court lentement	0,85	0,15	0	0	0
Court vite	0,9	0,1	0	0	0

TAB. 2.7 – Probabilité de changement de direction principale.

Plusieurs jeux de probabilités typiques ont été testés en annexe G. Ces combinaisons produisent des trajectoires équivalentes. Sans possibilité de confronter ces paramètres à des données mesurées, il faut se contenter de valeurs tirées arbitrairement parmi un ensemble de candidats acceptables. Un exemple de probabilités de changement de direction est donné dans le tableau 2.7.

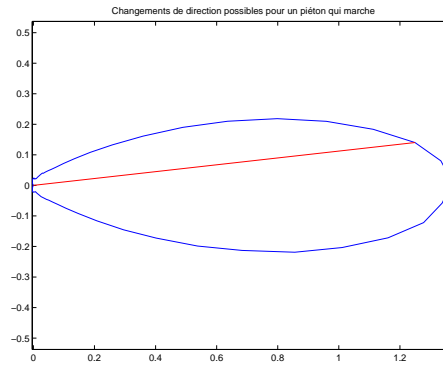


FIG. 2.16 – Probabilité de changement de direction pour un piéton qui marche. La longueur du rayon en un point de la courbe $\rho(\alpha)$ (coordonnées polaires) est la densité de probabilité qu'a le piéton d'opter pour la direction α représentée par le vecteur correspondant.

Une fois la direction principale connue, le changement de direction « fin » est également obtenu de manière aléatoire. La distribution suit une loi gaussienne centrée sur la direction principale et d'écart type égal à $\pi/12$. À titre d'exemple, la distribution des changements de direction autour de la direction actuelle, pour un piéton qui marche, est donnée figure 2.16.

Pour décrire complètement ce modèle à quatre états discrets, il reste à déterminer :

- le temps de passage d'un état à un autre,
- la durée minimale de maintien dans un état.

Des observations et mesures menées dans le cadre de cette thèse ont permis de confirmer l'ordre de grandeur de ces durées issu de résultats antérieurs [69, 86, 115]. Sachant qu'un piéton parcourt en moyenne 2,05 pas/s, l'échelle unitaire de « temps piéton » est fixée à une demi seconde [78]. Les temps de maintien dans le même état et les durées de transition seront des multiples de 0,5 s. De plus, à cause de l'inertie physique, les durées de maintien et de transition sont plus importantes lorsque l'allure augmente. Les valeurs retenues pour les durées de maintien sont données dans le tableau 2.8.

Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
0,5 s	0,5 s	1 s	1,5 s

TAB. 2.8 – Durée minimale de maintien dans un état.

Comme peu d'informations sont disponibles sur les changements de direction, pour un piéton à l'arrêt, la durée d'un changement de direction est prise proportionnelle à la valeur absolue de l'angle. Quand il est mobile, les changements de direction du piéton sont plus limités (page 49). Le changement de direction aura la même durée que la transition ou le cycle. Ils sont récapitulés tableau 2.9 et présentés figure 2.17.

Activité	Durée
Changement vers un état adjacent (immobile \rightarrow marche, marche \rightarrow jogging ...)	environ une seconde
Changement vers un état non adjacent (immobile \rightarrow jogging)	environ 1.5 secondes
Changement de direction en mouvement	simultané au changement d'état
Changement de direction, immobile	environ une seconde pour π rad, évolution linéaire (0,5 s pour $\pi/2$ rad. ...)

TAB. 2.9 – Temps de transition.

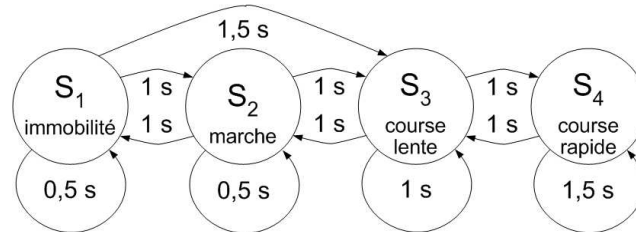


FIG. 2.17 – Diagramme des temps de transition.

La probabilité qu'un piéton change d'état à la fin du cycle d'état actuel est estimée. Certaines valeurs ont été choisies *a priori*, sachant que le choix le plus vraisemblable pour un piéton est de rester dans le même état, ou sinon d'évoluer vers un état voisin. Cependant,

comme pour la distribution des changements de vitesse (page 49), ces probabilités ne peuvent pas être estimées avec précision. Plusieurs jeux ont été testés en simulant mille trajectoires par jeu de paramètres). Leur réalisme a été évalué graphiquement [57]. Les résultats obtenus pour ces sept jeux de paramètres, décrits en annexe G, confirment qu’une connaissance approximative de ces paramètres suffit. Un jeu de probabilités acceptable est présenté tableau 2.10.

$S_n \backslash S_{n+1}$	Immobile	Marcher	Jogging	Courir
Immobile	0,95	0,04	0,01	0
Marcher	0,09	0,9	0,01	0
Jogging	0	0,07	0,85	0,08
Courir	0	0	0,15	0,85

TAB. 2.10 – Probabilité de changement d’état.

2.4 Résultats

2.4.1 Évaluation des trajectoires et comparaisons

Ce modèle de trajectoires de piétons a été utilisé pour reproduire les scénarios de trajectoires de piétons obtenues grâce au chapitre 1, sur les accidents V-P. Toutes les trajectoires de piétons décrites dans [58] ont pu être générées par ce modèle à quatre états.

Les différences entre la forme générale des trajectoires générées par les trois modèles, « de Nicolao », « de Nicolao modifié » et à quatre états discrets, sont observables figure 2.18.

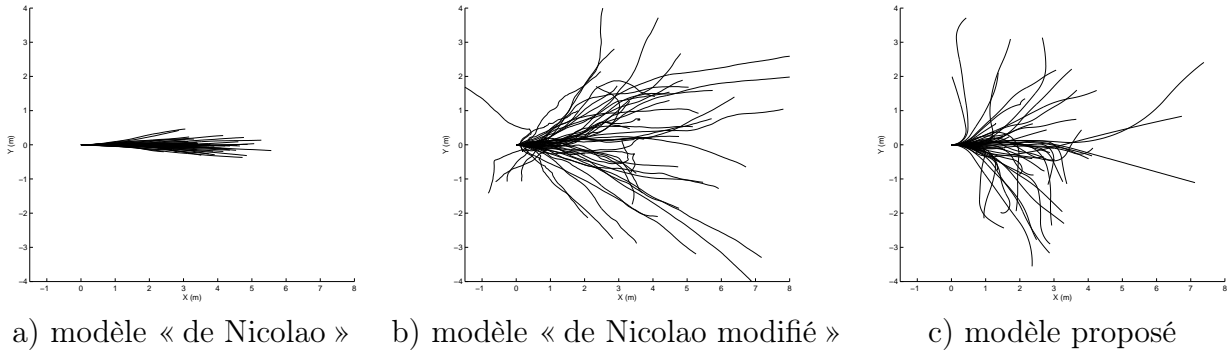


FIG. 2.18 – Comparaison de trajectoires générées par les trois modèles. Durée : trois secondes, pas temporel de simulation : 10 ms.

Pour comparer ces trois modèles de manière équitable, le piéton est, dans tous les cas, initialement en train de marcher, selon l’axe Ox, dans le sens des x croissants. Cinq-cents trajectoires ont été générées à partir des mêmes conditions initiales, pour chacun des trois modèles. Elles ont été analysées selon deux critères :

1. Le réalisme de chaque trajectoire : tableau 2.11, les modèles « de Nicolao » et à « quatre états » génèrent des trajectoires très réalistes (ou physiquement possibles), alors que le modèle « modifié » génère une part importante de trajectoires aberrantes.

Pas de simulation (ms)\Modèle	« de Nicolao »	« de Nicolao modifié »	à quatre états
10	100	86,8	97,6
25	100	81,6	97,2
50	99,2	83,2	96,8
125	97,2	83,2	96,8
Meilleur cas	100	86,8	97,6

TAB. 2.11 – Taux de trajectoires réalistes : classification de 500 trajectoires de 5 s pour chaque modèle et chaque pas temporel.

2. La couverture des situations réelles par l'ensemble des trajectoires générées par un modèle est donnée tableau 2.12. Le modèle « de Nicolao » couvre peu de situations réelles, alors que les situations courantes pour un piéton qui traverse, ou présent au voisinage d'une route, peuvent être générées par les modèles « modifié » et « à quatre états ».

Comportement \Modèle	« de Nicolao »	« de Nicolao modifié »	À quatre états
Marche tout droit	oui	oui	oui
Marche en diagonale	oui	oui	oui
Tourne rapidement	selon pas temporel	oui	oui
S'arrête/fait du surplace	très rare	rare	oui
Change de file progressivement	selon pas temporel	oui	oui
Change de file rapidement	non	oui	oui
Marche arrière	non	oui	non
Mouvement erratique	rare	oui	oui
Tourne sur lui-même	non	oui	oui
Contourne obstacle	selon pas temporel	oui	oui
Court	rare	rare	oui
Bilan (score sur 11)	4,1	9,6	10

TAB. 2.12 – Couverture des comportements typiques de piétons. Pour chaque modèle, mille trajectoires de 5 s ont été générées et évaluées. Un « oui » donne 1 point, un « rare » donne 0,3 point, un « selon pas temporel » donne 0,5 point, un « non » donne 0 point.

Globalement, le modèle à quatre états présente le meilleur compromis taux de trajectoires réalistes et représentativité du comportement des piétons.

2.4.2 Limites du modèle proposé et améliorations potentielles

Une prise en compte des points suivants, non traités par le modèle proposé, permettrait d'améliorer le réalisme des trajectoires de piétons pour le besoin de cette thèse :

- Des manœuvres de dernière chance tels les sauts, les pas de côté, les pas en arrière... ne sont pas directement modélisées et générées par ce modèle, faute d'informations fiables.
- Certains paramètres comme la durée des cycles, changement d'angles, probabilités de changement de cycle, ne peuvent pas être mesurés. Actuellement, seule une estimation des ordres de grandeur est envisageable.

- Les temps de transition et de maintien sont des multiples de 0,5 s qui n'est qu'une valeur moyenne, une version plus avancée devrait tenir compte des fluctuations de ces durées.

D'autres facettes du comportement du piéton mériteraient d'être approfondies afin d'utiliser ce modèle pour d'autres applications que les simulations et la prédiction de chocs V-P.

- Les changements de voie, c'est à dire le retour à la direction de progression initiale après avoir brièvement changé de direction, illustrés figure 2.19, ne sont pas toujours très réalistes. Ce n'est pas gênant à une échelle de temps de quelques secondes mais ce comportement fréquent semble requis pour simuler les interactions entre le piéton et son environnement.
- Le modèle génère un comportement de piéton en boucle ouverte qui ne tient pas compte de l'environnement. Le piéton est supposé évoluer en espace libre, sans aucune contrainte physique. La fatigue, la lassitude, la perception, les motivations et l'état psychologique du piéton ne sont pas pris en considération, pas plus que les infrastructures routières et la présence d'obstacles.

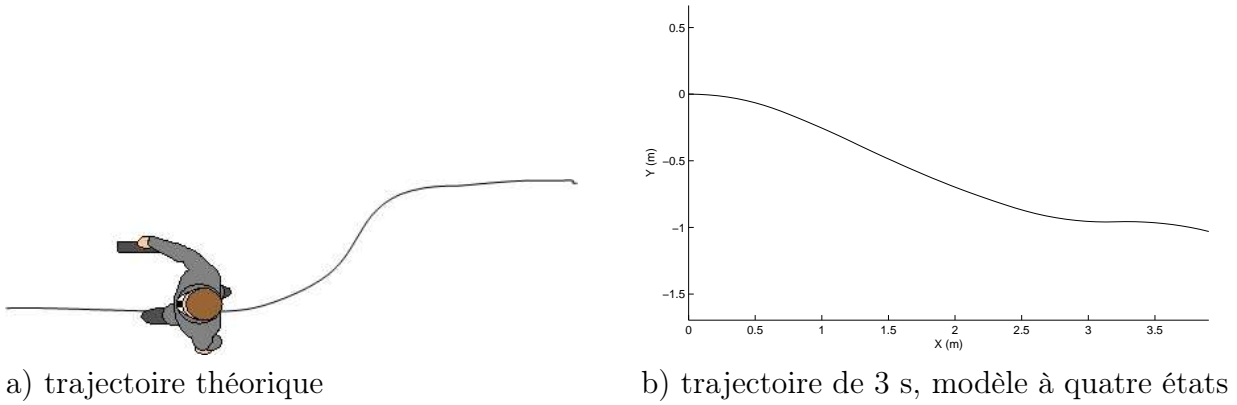


FIG. 2.19 – Changement de voie.

2.4.3 Applications

2.4.3.1 Prédiction de l'état du piéton

Connaissant l'état $S(t_i)$ du piéton à l'instant t_i , la probabilité qu'il soit dans l'état $S(t_f)$ à l'instant t_f se calcule facilement, grâce à la programmation dynamique [116] :

$$p(S(t_f)|S(t_i)) = \sum_{c_k \in \mathcal{C}_{S(t_i) \rightarrow S(t_f)}} p(c_k) \quad (2.14)$$

où $\mathcal{C}_{S(t_i) \rightarrow S(t_f)}$ est l'ensemble des chemins de $S(t_i)$ à $S(t_f)$ et

$$p(c_k) = p(S(t_1)|S(t_i))p(S(t_2)|S(t_1))...p(S(t_{k+1})|S(t_k))...p(S(t_f)|S(t_n)), \quad (2.15)$$

à condition que $t(c_k) = t(S(t_1)|S(t_i)) + t(S(t_2)|S(t_1)) + ... + t(S(t_{k+1})|S(t_k)) + ... + t(S(t_f)|S(t_n))$ vérifie

$$t(c_k) = t_f - t_i. \quad (2.16)$$

Si la somme des temps de passage autorise un chemin, l'« algèbre des Chemins » permet de calculer la probabilité que ce chemin soit emprunté [116]. Chaque chemin autorise un nombre important de vecteurs vitesses cibles, dont la répartition se calcule analytiquement d'une transition à l'autre. En théorie, les évolutions du piéton et de ses variables d'état sont représentables sur un arbre.

Cependant, la complexité augmente vite : si, à un instant donné, la probabilité pour un piéton d'être dans un des quatre états est uniforme, un état débouche sur 2,75 états suivants. À chaque état correspondent en moyenne 4,75 principaux changements de direction et en moyenne 13,062 5 « trajectoires principales » sont autorisées lors d'une transition. La durée moyenne d'une transition est de 0,865 s. Une prédiction dans une seconde nécessite, en moyenne, deux transitions, ce qui fait potentiellement $13,062\ 5^2 \approx 170$ chemins principaux.

La dimension de l'espace des états augmente très vite avec la durée des simulations, ce qui limite le recours aux calculs analytiques.

2.4.3.2 Prédiction de position

Connaissant la position initiale d'un piéton à l'instant t , et disposant éventuellement d'informations supplémentaires sur son état, telles son allure, sa vitesse et/ou son orientation, sa position dans ΔT est prédictible.

Certains chemins peuvent être considérés comme équivalents si l'on ne s'intéresse qu'à la position finale. Par exemple, si le piéton ne change pas de direction, les séquences : « marcher \rightarrow marcher \rightarrow courir \rightarrow marcher », et « marcher \rightarrow courir \rightarrow marcher \rightarrow marcher », sont équivalentes vis-à-vis de la position finale.

Cependant, si la notion d'équivalence de trajectoires vis-à-vis de la position finale est aisée et théoriquement exploitable, le passage à la pratique est moins évident à cause de la complexité croissante au fur et à mesure que l'horizon de prédiction s'étend.

Comme le modèle d'évolution du piéton est probabiliste, des simulations de Monte Carlo permettent de connaître la distribution de probabilité des positions. L'annexe I donne quelques résultats sur la prédiction de position à une et trois secondes. Le caractère non gaussien et la complexité croissante des distributions de positions limitent les possibilités d'en donner une expression analytique simple. Il faudra se contenter de données numériques.

2.4.3.3 Prédiction de choc / non choc

Selon le même principe que pour la génération de trajectoires, mais cette fois avec un autre mobile, il est possible de générer un ensemble de couples de trajectoires et d'estimer la probabilité de choc. La notion de choc V-P, présentée au § 3.3.2, est définie comme une intersection ou un frôlement des trajectoires.

Pour les mêmes raisons que pour la prédiction de position de piéton, l'approche analytique est vite limitée par la complexité du modèle et des calculs. De plus, pour savoir s'il y a un choc sur une trajectoire, la connaissance de l'ensemble des positions que prend le piéton au cours du temps est requise. Ce n'est pas réalisable de manière analytique. Le chapitre suivant montrera comment l'utilisation du modèle piéton à quatre états et de simulations de Monte Carlo permet d'estimer une probabilité de choc et le niveau de danger *a priori*.

2.5 Bilan de la modélisation du comportement des piétons

Un état de l'art des études sur les piétons a été réalisé. Certaines études se contentent d'observer et de décrire le comportement des piétons alors que d'autres proposent des analyses et des modèles permettant d'expliquer et de simuler le comportement des piétons.

Un modèle, basé sur une marche aléatoire [108], a été distingué. Ce modèle étant limité par un faible réalisme, un nouveau modèle a été proposé.

Ce modèle repose sur quatre états discrets (immobilité, marche, course lente, course rapide) dont découlent des contraintes et des lois statistiques sur les normes de vitesses ainsi sur que les changements de direction. Comme dans la réalité, le piéton se fixe une vitesse et une direction cibles et cherche à les atteindre. Le déplacement découle de la combinaison de ces deux grandeurs.

Ce modèle et ses propriétés, parmi lesquelles le déterminisme par morceaux, seront utilisés au chapitre suivant, pour évaluer la probabilité de choc véhicule-piéton.

Combiner ce modèle purement probabiliste avec des modèles de déplacement de piétons gérant les interactions avec l'environnement : utilisation des infrastructures, évitement de collisions entre piétons, prise en compte d'obstacles fixes... permettrait d'étendre son utilisation à d'autres domaines.

Chapitre 3

Estimation de la probabilité de choc véhicule-piéton

3.1 Introduction

Après l'étude des accidents véhicule-piéton au chapitre 1, l'exploration du comportement des piétons et l'obtention d'un modèle réaliste au chapitre 2, la prédiction de collisions véhicule-piéton est traitée dans ce chapitre.

Prédire un choc revient à estimer la probabilité de choc véhicule-piéton (V-P) et, le cas échéant, à estimer les caractéristiques du choc : la probabilité de choc, $P(choc)$, le temps avant impact, t_{ti} , et, éventuellement : la vitesse du véhicule lors de l'impact, v_i , et la zone d'impact, z_{ip} .

L'objectif de ce chapitre est de réaliser une prédiction de chocs véhicule-piéton à partir des données obtenues :

- par un système, embarqué sur véhicule, de détection de piétons et d'estimation de leurs position et vitesse relatives,
- par les capteurs de dynamique véhicule qui estiment la vitesse et l'accélération du véhicule.

Dans la réalité, cette estimation de l'état actuel ne sera pas parfaite : les mesures sont entachées d'une erreur. La robustesse de la prédiction vis-à-vis des incertitudes de mesure sera étudiée au chapitre 4. De plus, en conditions pré-crash, le déclenchement des contre-mesures doit se faire le plus tôt possible. L'étape de prédiction de choc doit respecter la contrainte temps réel et il faudra en tenir compte pour les algorithmes proposés.

Ce chapitre s'organise de la façon suivante :

- 3.2 :** Dans un premier temps, l'état de l'art sur la détection de collisions et la prédiction de collisions est présenté. Ces travaux ont pour application la prédiction de conflits entre avions, ainsi que de l'anti-collision en automobile, avec des véhicules autonomes ou conduits par des hommes. La prédiction d'accidents véhicule-piéton y figure.
- 3.3 :** Ensuite, les définitions et spécifications de la prédiction de chocs V-P sont détaillées.
- 3.4 :** Les algorithmes de prédiction de chocs sont alors présentés. La prédiction est effectuée de façon « nominale » ou « probabiliste ». Dans ce dernier cas, elle est réalisée grâce à des simulations de Monte Carlo.

3.5 : Des résultats issus de simulations permettent d'évaluer et de comparer les performances des méthodes de prédiction.

3.6 : Ce chapitre est conclu par un bilan sur la prédiction de chocs et sur des perspectives.

3.2 Présentation de l'existant

Cette partie passe en revue les travaux sur la détection et la prédiction de collisions.

3.2.1 Détection de collision entre objets

Dans son mémoire, Sundaraj évalue les algorithmes de calcul de distance entre objets géométriques et de détection de collisions en utilisant les enveloppes convexes, mais aussi des objets déformables non convexes [117].

L'optimisation de la complexité des traitements et du temps de calcul, tout en minimisant les erreurs d'approximation permet une utilisation en simulation dynamique grâce à des fonctions simples pour le calcul de distances « point/point, point/arête, point/facette ».

3.2.2 Trafic aérien et résolution de conflits

La gestion du trafic aérien est concernée par les risques de collision. La détection de conflits entre aéronefs et leur résolution est en grande partie automatisée.

Kuchar et Yang passent en revue et formalisent les principales méthodes employées mises en oeuvre pour ces fonctions [118]. Selon leur point de vue, un conflit est défini par un défaut de séparation minimale.

Le but d'un système de détection et résolution de conflits est de :

1. prédire qu'un conflit aura lieu dans le futur,
2. prévenir l'opérateur humain de la détection d'un conflit,
3. éventuellement, l'assister dans la résolution du conflit.

Le principe, donné figure 3.1, est proche de celui des systèmes d'alerte dans le domaine des aides à la conduite sur véhicules routiers. L'opérateur humain n'est alerté qu'en cas de besoin, pour limiter les alertes intempestives. Un conflit prédit dans un horizon de temps très lointain a une faible probabilité de se réaliser.

La prédiction, encore appelée propagation des états ou extrapolation, est réalisée selon une des trois méthodes génériques présentées ci-dessous.

Méthode nominale : aussi qualifiée de « déterministe ». Une seule trajectoire est calculée à partir de l'état mesuré et d'un modèle déterministe, sans tenir compte d'incertitudes sur l'évolution des variables d'état. L'utilisation de la prédiction nominale est adaptée à des cas où les incertitudes sont faibles : très bonne estimation des variables d'état actuelles et prédiction sur un horizon de temps court terme.

Méthode pire cas : à l'opposé de la méthode nominale, cette prédiction suppose que les mobiles peuvent effectuer toutes sortes de manœuvres. Il suffit qu'une seule manœuvre débouche sur un conflit pour que l'alerte soit donnée. Ce type de prédiction garantit le

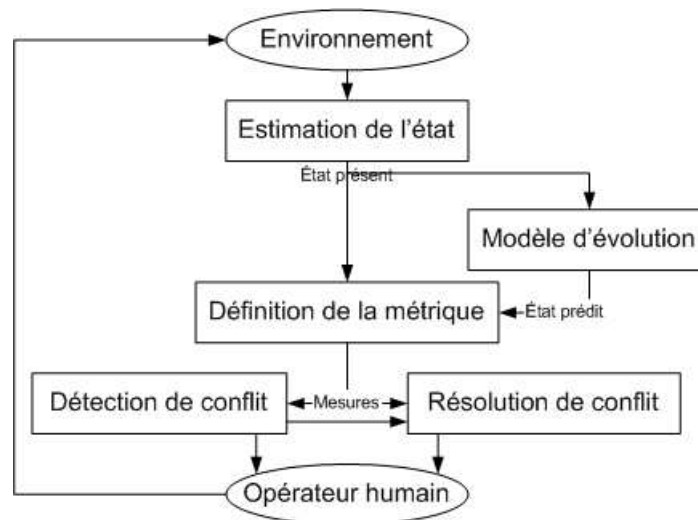


FIG. 3.1 – Détection et résolution des conflits entre aéronefs. La métrique est l'ensemble des règles d'attribution de valeurs numériques aux distances [118].

meilleur niveau de protection (tous les conflits sont détectés), mais il génère en contrepartie un nombre important de déclenchements intempestifs.

Méthode probabiliste : les différentes évolutions possibles des états sont intégrées et considérées comme des incertitudes. Par exemple, une erreur sur la position s'ajoute à la prédiction selon la méthode nominale. Une autre approche consiste à générer un ensemble de trajectoires aléatoires, à partir d'un modèle probabiliste, et à estimer leurs probabilités de réalisation. Le bruit d'évolution sur la vitesse ou l'accélération se modélise par un mouvement brownien [119]. Cette approche est comparable à celle utilisée dans le chapitre 2 pour modéliser le comportement des piétons et à [108].

Les méthodes nominale et pire cas peuvent être considérées comme des cas particuliers de la méthode probabiliste : la méthode nominale revient à privilégier la trajectoire la plus vraisemblable, alors que dans l'approche pire cas, toutes les trajectoires sont affectées de la même probabilité.

Les problèmes de définition et de choix des seuils d'alarme, pour trouver le meilleur compromis entre le taux de détections correctes et le taux de fausses alarmes, sont formalisés dans [118]. Le critère de détection/non détection de conflit est parfois simple, tel un seuil sur une seule variable, ou composé d'un ensemble de combinaisons logiques.

Kuchar et Yang se penchent également sur l'évaluation des performances des systèmes de détection et résolution de conflits. Les tests sont réalisés grâce à des simulations (Monte Carlo ou études avec homme dans la boucle). Les performances obtenues dépendent à la fois du système de détection et de la base de situations sur laquelle sont réalisés les tests.

Les courbes COR, caractéristiques opérationnelles de réception, obtenues en traçant le taux de détection correctes en fonction des fausses alertes, permettent de choisir le point de fonctionnement optimum. Un choix est fait sur l'horizon de prédiction. Des considérations d'ordres stratégique ou économique entrent également en compte. À l'issue de leur évaluation, aucun système ne se détache réellement du lot.

3.2.3 Anti-collision dans l'automobile

3.2.3.1 Évitement de choc frontal véhicule-véhicule

Le problème des accidents causés par de « mauvais » conducteurs (au sens de : animés de mauvaises intentions) est traité grâce au formalisme des jeux différentiels [120]. Deux véhicules progressent selon des directions opposées, le « mauvais » conducteur tente de heurter le « bon » conducteur qui tente d'éviter la collision. L'évitement de collision est couvert par la théorie de poursuite et évasion. Le problème de prédiction de chocs est envisagé avec une approche « commande ». La formalisation : le « bon » conducteur (G) doit éviter le « mauvais » conducteur (W) à tout moment s'exprime sous forme de l'équation suivante :

$$\min_{\gamma_W \in \Gamma_W} \max_{\gamma_G \in \Gamma_G} \min_{t_0 \leq t < \infty} d(\mathbf{z}(t)) \quad (3.1)$$

où \mathbf{z} est le vecteur d'état, γ_G et γ_W sont respectivement les stratégies du « bon » et du « mauvais » conducteur, Γ_G et Γ_W sont respectivement les espaces des stratégies du « bon » et du « mauvais » conducteurs. $d(\cdot)$ est une distance, qui ne doit pas passer sous une valeur minimale pour que le choc soit évité.

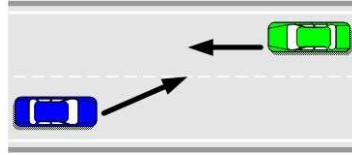


FIG. 3.2 – Véhicules évoluant en sens opposés.

La recherche de stratégies d'évasion est développée alors que la prédiction de chocs n'est pas réalisée de manière explicite dans [120].

3.2.3.2 Système d'alerte et d'évitement de choc fronto-arrière

Yang et al. s'intéressent à un système d'alerte et d'évitement de choc fronto-arrière. Comme sur la figure 3.3, deux véhicules roulent dans le même sens, le véhicule suivant heurte l'arrière du véhicule suivi [121]. Une méthode pour déterminer les seuils de déclenchement optimaux est décrite. Une formalisation du problème est proposée avec l'espace des états d'alerte, constitué des différentes variables nécessaires au calcul du risque de collision et regroupées dans le vecteur $\mathbf{x}(t)$. Son évolution dans le temps forme la trajectoire des états.

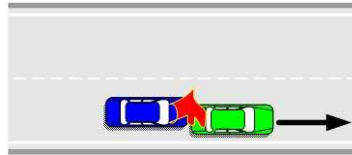


FIG. 3.3 – Choc fronto-arrière.

Dans cet espace des états, les zones contenant des événements indésirables, comme les collisions, forment l'« espace de danger ». Cet espace est constitué par l'ensemble des états

pour lesquels une alerte ou une contre-mesure est activée pour éviter de se retrouver plus tard dans l'« espace de danger ». Aucune alerte n'est déclenchée hors de l'espace des alertes. Les frontières de cet espace des alertes sont les seuils d'alerte. Déclencher correctement une alerte est rendu difficile par deux sources d'incertitudes sur l'estimation de l'état actuel et sur l'estimation de la trajectoire future.

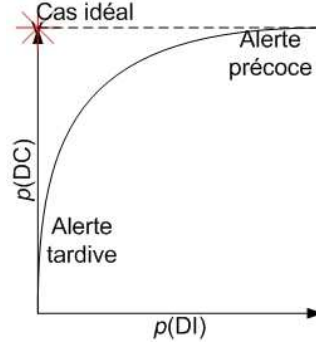


FIG. 3.4 – Courbe COS (Caractéristiques Opérationnelles du Système). Adapté de [121].

Ces incertitudes rendent le déclenchement d'alertes imparfait. Les performances d'un système d'alertes sont décrites par le taux d'« alertes correctes » $p(DC)$ et le taux d'« alertes inutiles » $p(DI)$. Le graphe obtenu figure 3.4, en traçant ces deux taux respectivement en abscisses et en ordonnées, est appelé caractéristiques opérationnelles du système, COS.

Le compromis à effectuer entre le taux de déclenchements inutiles $p(DI)$ et le taux de déclenchements corrects $p(DC)$ est rappelé :

- un déclenchement précoce assure un bon taux de déclenchements corrects mais également un nombre important de déclenchements inutiles,
- un déclenchement tardif limite à la fois le taux de bons déclenchements et les déclenchements intempestifs.

Une mesure de la performance d'un système d'alerte est proposée. Elle consiste à suivre l'évolution des deux taux en fonction de la stratégie de déclenchement (alerte tardive vs. alerte précoce). La différence entre les deux taux, $p(DI) - p(DC)$, illustrée figure 3.5 et appelée « intérêt de l'alerte », est un critère de sélection.

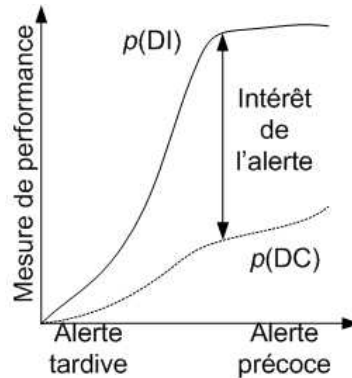


FIG. 3.5 – Mesure de performance de l'alerte.

Les taux $p(\text{DI})$ et $p(\text{DC})$ sont calculés grâce à des simulations de Monte Carlo sur des scénarios se terminant dans l'espace des collisions ou hors de cet espace. Les seuils d'alerte sont ensuite obtenus de manière numérique sur un nombre discret d'états. La frontière est approchée par une surface paramétrée.

3.2.3.3 Évitement intelligent de collisions automobiles

Deux articles du Robotics Institute, de l'Université de Carnegie Mellon [122,123] décrivent leurs contributions à un système de sécurité automobile. Il analyse l'environnement du véhicule équipé, en déduit, par une prédiction de trajectoires, la dangerosité des obstacles présents et déclenche une contre-mesure (alerte du conducteur), propose des actions au conducteur, ou prend le contrôle du véhicule pour appliquer la « meilleure » trajectoire.

Basée sur la théorie des jeux et supposant que chaque mobile se déplace à tour de rôle, selon sa propre stratégie, cette approche repose sur un arbre des décisions. La taille de l'arbre est de l'ordre de $O(a^n)$ où a est le nombre d'actions et n est le nombre de tours. Grâce à la programmation dynamique et un raisonnement sur l'espace des états, le nombre d'opérations se réduit à $O(sn)$ où s est la taille de l'espace des états. La trajectoire optimale, au sens d'un critère donné tel la sécurité, la vitesse, le confort, la fluidité... est alors sélectionnée.

L'algorithme de programmation dynamique ne réalise pas l'estimation de la probabilité de risque à cause du recours sur l'espace des états et à la perte de l'historique. Une méthode de Monte Carlo avec échantillonnage d'importance est utilisée.

Les auteurs annoncent une fréquence de travail de 2 Hz pour calculer la trajectoire future des objets mobiles, sur un PC avec processeur Intel® à 2 GHz. Or le pas de 500 ms n'est pas compatible avec une application de type pré-crash.

3.2.3.4 Sous-système de prédiction de collisions temps réel

Dans sa thèse, Augusto identifie les deux objectifs que doit assurer un sous-système de prédiction de collisions frontales et fronto-latérales [124] « traiter des données provenant d'un capteur et identifier les dangers potentiels de collision, » et « fournir à un module de supervision des informations dynamiques sur les collisions avec une certaine marge d'erreur. »

Ces deux besoins sont très similaires à ceux exprimés dans cette thèse. Deux thématiques principales sont abordées dans l'état de l'art de sa thèse :

1. identification d'un obstacle au sein d'un environnement,
2. définition des conditions de collision d'un obstacle.

Dans le cadre de cette thèse, seul le second point est considéré. La détection de piétons et l'estimation de leurs grandeurs cinématiques et/ou physiques ne seront pas traitées ici. Le but de ces travaux est d'aboutir à la spécification d'un tel sous-système.

Dans le test de collision en réalité virtuelle, Augusto privilégie, comme au § 3.2.1, l'utilisation de formes géométriques simples pour limiter les calculs, comme des cercles.

Dans l'algorithme de prédiction de collisions et d'estimation de temps avant collision, retranscrit figure 3.6, le temps avant impact est estimé de manière déterministe simple : $T_{col} = R/\dot{R}$. Pour améliorer les performances de cette prédiction, Augusto a utilisé des probabilités pour intégrer des informations *a priori* sur l'environnement routier et sur les mesures issues des capteurs.

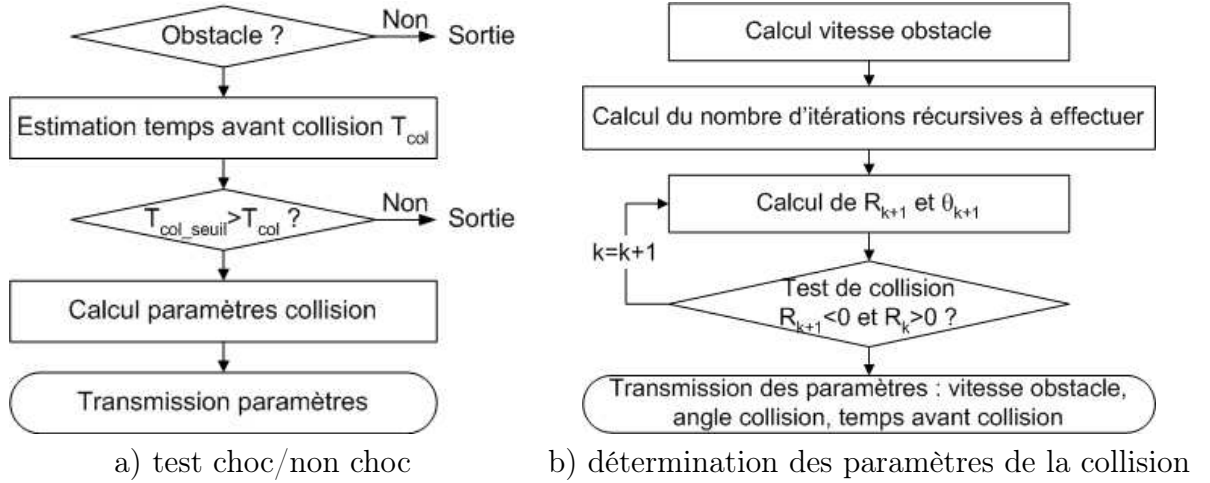


FIG. 3.6 – Algorithme de prédiction de collisions [124].

Augusto évalue les performances du sous-système grâce à une campagne de simulations et d'essais réels à partir de scénarios représentatifs issus de l'accidentologie. À l'issue d'un benchmarking, l'algorithme MPI/MIOP, Modèle de Perception de l'Infrastructure/Méthode d'Identification d'Obstacle en Phase, apparaît comme étant le meilleur pour la prédiction de collisions.

Ces travaux ont essentiellement porté sur la détection d'obstacles, la prédiction a été réalisée avec un algorithme de type « nominal ».

3.2.4 Prédiction de chocs véhicule-piéton

3.2.4.1 Représentation géométrique : EMERGE

Le modèle EMERGE permet de comprendre et de reconstruire simplement un accident V-P, en alliant la géométrie à la cinématique [115]. Ce modèle s'intéresse à la perception et la détection par le conducteur d'un piéton initialement masqué. Les vitesses du piéton et du véhicule sont supposées constantes. Le piéton est assimilé à un point.

EMERGE permet d'étudier l'influence de différents paramètres : la vitesse du véhicule, celle du piéton, l'angle entre les trajectoires, la position latérale de l'impact du piéton contre le véhicule, la position longitudinale du conducteur dans le véhicule, la distance parcourue par le piéton entre l'instant où il n'est plus masqué et l'instant de choc, le temps avant impact tel que le piéton est visible pour la première fois par le conducteur.

Ce modèle consiste en une formalisation du problème du piéton masqué. Moyennant quelques adaptations, il permettrait d'obtenir des résultats pertinents pour la détection de piétons en substituant le conducteur par un système de détection de piétons. Pour éviter tous les accidents V-P, où le piéton est masqué (scénario-type 1, cf. figure 1.4), il faudrait que la vitesse du véhicule soit inférieure à celle du piéton [115]!

Les simulations des trajectoires respectives du véhicule et du piéton n'étant pas représentatives des situations réelles, des modèles plus réalistes sont nécessaires.

3.2.4.2 Prédiction probabiliste

Les principes d'un système d'alerte en cas de collision et d'un système d'évitement de collision, reproduit figure 3.7 sont décrits dans [108].

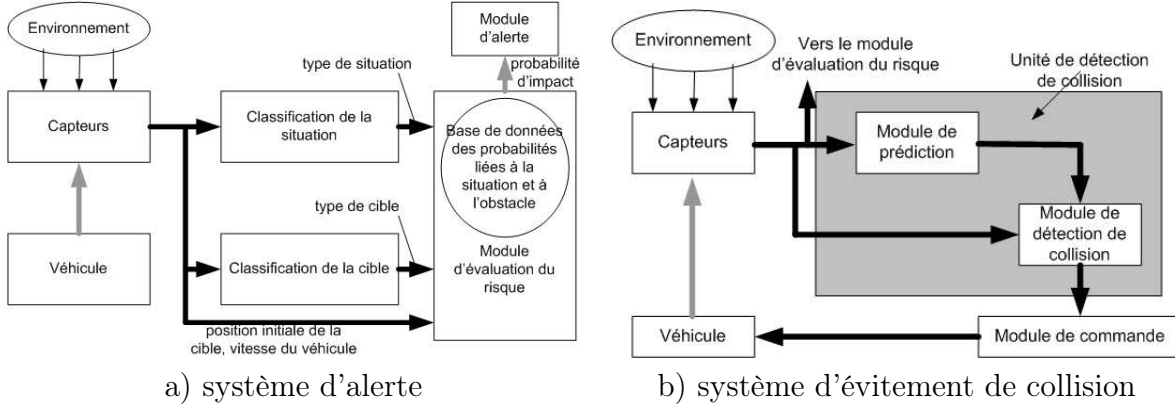


FIG. 3.7 – Principe d'un système de prévention des collisions [108].

De Nicolao et al. utilisent le modèle décrit dans au § 2.2.4, pour calculer, hors-ligne, le risque de collision lié à une situation V-P (§ 3.3.2.3). Le risque de choc est calculé sur un ensemble de situations de référence, couvrant une partie dénombrable de l'ensemble des cas possibles dans la réalité. Une approximation par des polynômes permet alors de connaître le risque de choc entre un véhicule et un piéton en tout point de l'espace des états. Un état correspond à la position relative du piéton par rapport au véhicule et à la vitesse du véhicule.

Ces travaux ne distinguent pas les cas où le piéton est immobile au bord de la route de ceux où le piéton marche sur la route. Plus de variables d'état sont nécessaires pour connaître avec précision le risque de collision. De plus, pour un grand nombre de cas, l'estimation du risque est affectée par le modèle de trajectoires.

3.3 Définitions et spécifications de la prédiction de chocs

Cette partie introduit et définit les principaux termes et concepts employés pour la prédiction de collisions V-P et/ou la validation par des simulations, abordée au chapitre 4. Dans un premier temps, les représentations géométriques et les modèles de trajectoires respectivement du véhicule et du piéton seront présentés au § 3.3.1. Puis les notions liées à la définition et à la détection de choc véhicule-piéton seront développées au § 3.3.2.

3.3.1 Géométrie et cinématique

3.3.1.1 Repères employés

Trois repères sont utilisés : route, véhicule et « face avant », donnés figure 3.8.

Soit $\mathcal{R} : (O, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})$, un repère orthonormé direct, supposé fixe, lié à la route. Le vecteur \mathbf{X} est parallèle à la voie et est orienté dans le sens de progression normale. Le vecteur \mathbf{Y} est

également compris dans le plan de la route. Le vecteur \mathbf{Z} est orthogonal à la route et orienté vers le ciel. Ce repère est pris de façon arbitraire, et est considéré comme référence.

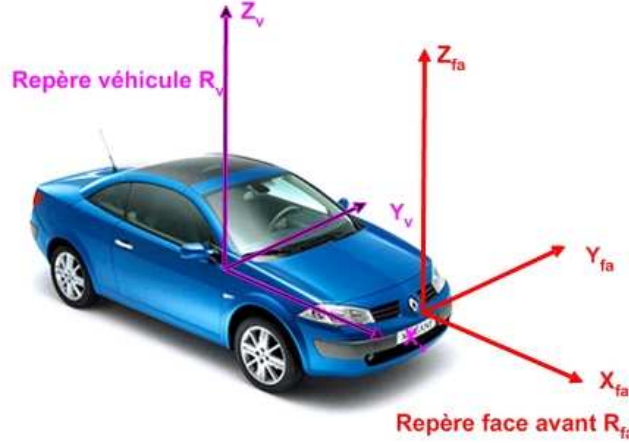


FIG. 3.8 – Repères véhicule et face avant. Image Renault ®.

Le repère véhicule est orthonormé direct, $\mathcal{R}_V : (O_V, \mathbf{X}_V, \mathbf{Y}_V, \mathbf{Z}_V)$, (cf. figure 3.8). Son origine est confondue avec le centre de gravité du véhicule. Le vecteur \mathbf{X}_V est orienté d'arrière en avant, le long de l'axe longitudinal du véhicule. \mathbf{Y}_V est perpendiculaire à cet axe et parallèle à l'axe latéral du véhicule et orienté de droite à gauche. Enfin, \mathbf{Z}_V est perpendiculaire aux deux vecteurs précédents et orienté vers le ciel.

Le repère véhicule \mathcal{R}_V est utilisé dans le domaine automobile, mais il n'est pas le mieux adapté à la prédiction de chocs avant V-P. Les vecteurs définissant le repère face avant, noté $\mathcal{R}_{FA}, (O_{FA}, \mathbf{X}_{FA}, \mathbf{Y}_{FA}, \mathbf{Z}_{FA})$, sont respectivement colinéaires à ceux du repère véhicule, donné figure 3.8. Le centre du repère face avant est fixé au centre du pare-choc avant du véhicule.

Dans le cadre de cette thèse, la route est supposée plane et comprise dans un plan horizontal. Seuls les déplacements sur ce plan seront traités. Les repères utilisés sont obtenus avec les origines, O , et les vecteurs \mathbf{X} et \mathbf{Y} .

3.3.1.2 Modélisation géométrique du piéton

Dimensions caractéristiques : le tableau 3.1 donne des informations représentatives des caractéristiques physiques et géométriques de quatre piétons « type ».

	Enfant 4 ans	Femme 5%	Homme 50%	Homme 95%
Hauteur avec chaussures (mm)	1004	1522	1715	1915
Longueur talon hanche (mm)	510	790	900	1030
Largeur maximum (cm)	34	49	54	57
Longueur foulée marche(cm)	34	53	60	69

TAB. 3.1 – Dimensions caractéristiques des piétons. Extrait de [125].

Cylindre englobant : une approche « géométrique » simplifiée du piéton est privilégiée. Le piéton est représenté par son cylindre « englobant » et son centre de gravité est situé

sur l'axe de symétrie du cylindre. Cette représentation du piéton est grossière, puisque son corps n'est pas réparti de manière homogène à l'intérieur du cylindre. De plus, le corps du piéton est déformable, la répartition à l'intérieur du cylindre sera variable. Elle constitue néanmoins le meilleur compromis réalisme/simplicité. En effet, la forme cylindrique facilite particulièrement le test choc/pas de choc, décrit au § 3.3.2.



FIG. 3.9 – Cercle englobant le piéton. Le piéton est « projeté » sur le plan horizontal.

Les mensurations d'un homme 50^e percentile, debout, sont retenues. Le cylindre englobant mesure 1,71 m de haut pour un diamètre de 60 cm, correspondant à la longueur d'un de ses pas à une allure confortable. Le piéton est modélisé par son cercle englobant, donné figure 3.9.

Orientation du piéton : le piéton ne se déplace pas de manière isotrope, il a tendance à avancer devant lui. Son orientation, mesurée par l'angle α , est définie figure 3.10.

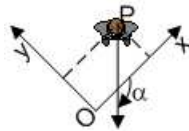


FIG. 3.10 – Orientation du piéton.

3.3.1.3 Modélisation géométrique du véhicule

Parallélépipède englobant : étant donné l'ordre de grandeur des dimensions d'un véhicule par rapport à celui d'un piéton, le véhicule est assimilé à un parallélépipède centré autour de son centre de gravité. Les dimensions présentant un intérêt sont la hauteur, la longueur et la largeur hors tout (celles de la Vel Satis modèle 2002 sont présentées tableau 3.2). Comme dans le cas du piéton, la représentation dans le plan horizontal suffit, le véhicule sera modélisé par un rectangle.

Grandeur	Cote	Description
Empattement	2 840 mm	distance entre les centres des deux roues d'un même côté
Voie arrière	1 550 mm	distance entre les centres des deux roues arrières
Longueur hors tout	4 860 mm	distance d'une extrémité longitudinale à l'autre
Largeur hors tout	1 860 mm	distance d'une extrémité latérale à l'autre
Hauteur à vide	1 577 mm	distance entre le sol et le point le plus haut

TAB. 3.2 – Dimensions caractéristiques d'une Renault Vel Satis.

Orientation du véhicule : dans le plan horizontal, l'angle formé par les vecteurs $(\mathbf{X}, \mathbf{X}_V)$ suffit à décrire l'orientation du véhicule.

3.3.1.4 Trajectoire du piéton

Sur un faible intervalle de temps, de l'ordre de quelques dixièmes de secondes, les déplacements d'un piéton peuvent être approchés par un mouvement uniformément accéléré. Au delà, le modèle de trajectoires de piétons, proposé au chapitre 2, est utilisé.

3.3.1.5 Trajectoire du véhicule

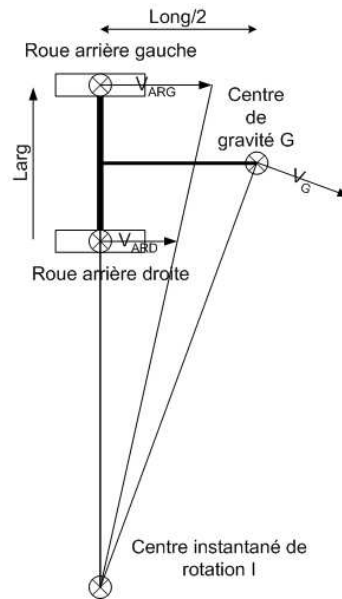


FIG. 3.11 – Géométrie et cinématique du modèle « roues arrières ». Le centre instantané de rotation (quand il existe) est extrait, puis la vitesse du centre de gravité est calculée. Les trajectoires sont obtenues en intégrant les vitesses.

Pour simuler la trajectoire d'un véhicule à quatre roues, trois modèles ont été envisagés :

Mouvement uniformément accéléré par morceaux, les trajectoires générées, à partir de la cinématique du point, ont un comportement longitudinal acceptable. Par contre, les accélérations latérales peuvent générer des mouvements « en crabe », sans tenir compte des spécificités de la trajectoire réelle d'un véhicule.

Le modèle à deux roues ou modèle bicyclette dont l'utilisation nécessite de connaître avec précision plusieurs paramètres de la dynamique du véhicule [126]. Cette prise en compte alourdit les calculs pour un niveau de réalisme superflu.

Le modèle roues arrières permet de générer la trajectoire du véhicule à partir de sa position initiale et à l'évolution dans le temps des vitesses des roues arrière gauche et droite [127]. À partir de ces deux vitesses, le centre instantané de rotation, s'il existe, est calculé et la vitesse en tout point du véhicule s'obtient facilement, comme l'illustre la figure 3.11. Ce modèle suppose que les roues roulent sans glisser et ne tient pas compte des déformations des trains et des pneumatiques. Le mouvement obtenu est plus réaliste que dans le cas d'un mouvement uniformément accéléré par morceaux. De plus, les vitesses des roues arrière gauche et droite sont mesurées par des capteurs et elles

sont disponibles sur le bus CAN des véhicules. Des trajectoires réelles pré-enregistrées peuvent être « rejouées ».

Une comparaison de ces trois modèles est donnée tableau 3.3. Le but de cette thèse n'est pas de représenter le plus fidèlement l'évolution de la dynamique du véhicule, mais de disposer d'un modèle générant des trajectoires suffisamment réalistes et contrôlables. Le modèle « roues arrières », présentant le meilleur compromis, est retenu.

Caractéristique \ Modèle	MUAM	2 roues	roues arrières
Réalisme	faible	très bon	bon
Complexité	simple	importante	moyenne
Import trajectoires réelles	difficile	moyenne	très aisée

TAB. 3.3 – Comparaison des modèles de trajectoires de véhicules.

3.3.1.6 Types de trajectoires

La trajectoire d'un mobile, piéton ou véhicule, est générée de deux manières :

déterministe : les paramètres cinématiques sont connus avant la génération de trajectoire,

aléatoire : seule la situation initiale est donnée, l'évolution du mobile se fait en suivant des lois statistiques, intégrées dans un modèle.

3.3.2 Choc avant véhicule-piéton

3.3.2.1 Notion de choc géométrique

Seuls les chocs avec la face avant du véhicule sont pris en considération. Cette face avant est modélisée par un segment ayant pour dimension la largeur du véhicule. Figure 3.12, le piéton est assimilé à un cercle de diamètre égal à la largeur maximale d'un piéton 50^e percentile.

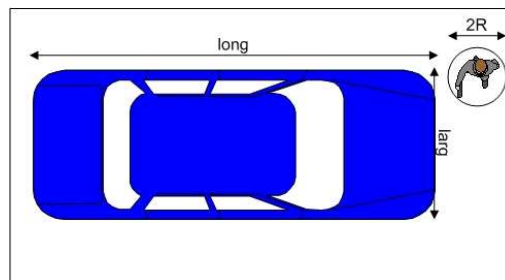


FIG. 3.12 – Formalisation du choc avant véhicule-piéton, plan horizontal.

La zone de choc V-P correspond à une intersection entre le segment représentant la face avant du véhicule et le disque, représentation du piéton. Le problème se simplifie en ramenant le piéton à un point. L'aire de la zone de choc, représentée figure 3.13, vaut :

$$AIRE_1 = R(\pi R + larg) \quad (3.2)$$

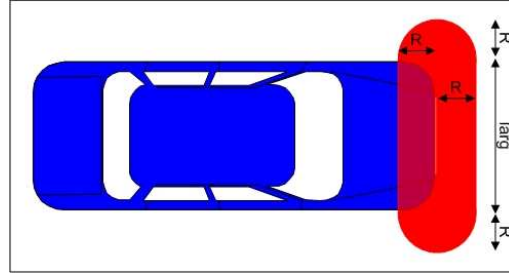


FIG. 3.13 – Géométrie d'un choc frontal véhicule-piéton. La zone de choc est donnée en rouge.

La répartition du corps du piéton dans le disque n'étant pas homogène, une troisième zone, présentée figure 3.14, complète la description. Cela donne :

1. « pas de choc », ie. pas de recouvrement du piéton par la face avant,
2. évolution de la gravité « choc » / « non choc », moins de la moitié du cercle englobant piéton est recouverte par la face avant,
3. choc : la majorité du piéton est recouverte par l'avant du véhicule.

À l'intérieur de la zone intermédiaire, une fonction, du type gravité de l'impact, qui passerait de manière continue de 0, pas d'impact, à 1, impact certain, est définie. Cette fonction peut dépendre de la position du piéton, mais également de sa direction, afin de tenir compte, par exemple, de la répartition non uniforme du corps du piéton à l'intérieur du disque. La notion de choc correspondrait alors au franchissement d'un seuil.

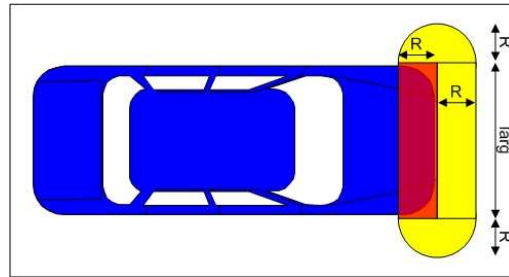


FIG. 3.14 – Prise en compte de la gravité variable lors de contacts véhicule-piéton. La zone de choc certain est en rouge, la zone de gravité variable est de couleur jaune.

Cette possibilité de pondérer la gravité d'un impact pourra être employée lors de l'évaluation de systèmes réels. *A priori*, il est plus simple de prédire un choc ayant lieu au milieu de la face avant du véhicule plutôt qu'un choc ayant lieu sur un des bords gauche ou droit [5].

Ces deux représentations géométriques d'un choc avant V-P sont réalistes et le niveau de réalisme de la seconde représentation est même adaptable. Cependant, les calculs nécessaires pour tester la situation sont coûteux. La zone de choc définie en figure 3.15 apporte un réalisme voisin de celui du motif de la figure 3.13, pour moins de calculs. Dans le repère FA , un test sur la position longitudinale du piéton et éventuellement un autre sur la position latérale suffisent. L'aire de la zone de choc vaut :

$$AIRE_2 = R(4R + larg) \quad (3.3)$$

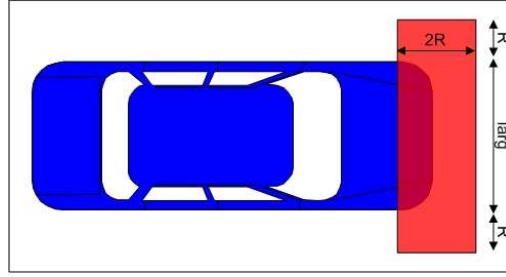


FIG. 3.15 – Modélisation simplifiée d'un choc véhicule-piéton.

Cette nouvelle définition surestime l'aire de choc définie par la figure 3.13 de

$$\Delta(AIRE) = AIRE_2 - AIRE_1 = R^2(4 - \pi), \quad (3.4)$$

soit en valeur relative,

$$\frac{\Delta AIRE}{AIRE_1} = \frac{R(4 - \pi)}{\pi R + larg}. \quad (3.5)$$

Pour $larg \approx 1,86$ m et $R \approx 0,3$ m, choisir la zone de la figure 3.15 plutôt que celle de la figure 3.13 entraîne une surestimation de la zone de choc d'environ 9%, et des fausses alarmes supplémentaires.

3.3.2.2 Choc spatio-temporel, temps d'impact

Le choc est un « rendez-vous spatio-temporel ». Le paragraphe précédent apporte une définition du choc géométrique, indépendante du temps. Pour déterminer l'instant d'impact d'une situation V-P, il ne suffit pas de donner les instants pendant lesquels véhicule et piéton sont en situation de recouvrement, comme sur la figure 3.16. L'instant d'impact est le premier instant à partir duquel le seuil de choc est franchi à la hausse.

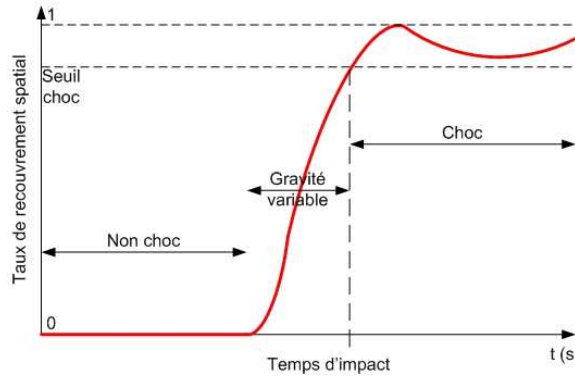


FIG. 3.16 – Définition du temps (ou instant) d'impact.

3.3.2.3 Notion de situation-test et de scénario

Une trajectoire de piéton et une trajectoire de véhicule forment une « situation-test ». À un instant donné, l'état du véhicule et du piéton est appelé une situation V-P, qui ne suppose

rien sur les instants précédents ni suivants.

Un ensemble de situations-tests présentant des similarités au niveau du déroulement est qualifié de « scénario ». Ceci permet de conserver la cohérence avec la notion de scénario-type définie au chapitre 1.

3.3.2.4 Choc à ΔT / dans ΔT

Il convient de distinguer deux cas pour le temps d'impact :

le choc a lieu à ΔT : signifie que le temps d'impact, noté toi , time of impact en anglais, est égal à la somme de l'instant actuel, t et de ΔT , soit : $toi = t + \Delta T$. La durée ΔT est appelée temps avant impact ou temps à impact et notée $t ti$, time to impact en anglais.

le choc a lieu dans ΔT : le temps d'impact est situé dans l'intervalle défini par le temps actuel, t , et $t + \Delta T$, soit : $toi \in [t; t + \Delta T]$.

3.3.2.5 Test de choc simplifié

Lors de la simulation d'un couple de trajectoires V-P, tester, à chaque instant t_i , l'appartenance du point qui représente le piéton à la zone de choc est coûteux en temps de calcul. L'abscisse du piéton dans le repère FA instantané, ou position longitudinale, décroît avec le temps. La composante longitudinale de la vitesse relative du piéton dans ce repère est essentiellement constituée par la vitesse propre du véhicule et elle est beaucoup plus importante que celle du piéton [114].

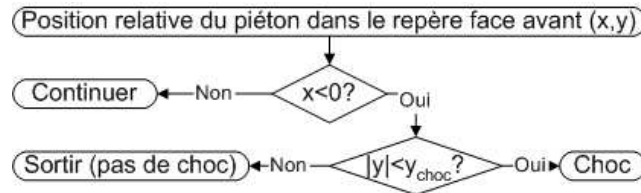


FIG. 3.17 – Classification d'une situation véhicule-piéton.

Vis-à-vis du test de choc, la figure 3.17 donne trois cas possibles, en fonction de la position relative du piéton dans le repère face avant :

Choc : le piéton vient de passer dans la zone de choc, la simulation s'arrête après cet instant.

Continuer : le piéton n'est pas encore passé dans le demi-plan des abscisses négatives, la simulation continue aux pas suivants.

Sortie : le piéton est passé « derrière » la zone de choc potentiel, il ne risque plus d'être heurté par la face avant du véhicule, la simulation s'arrête.

Si, à l'instant t_i il y a « Choc », alors le choc a eu lieu entre les instants t_{i-1} et t_i . Interpoler les trajectoires sur cet intervalle permet d'affiner le calcul du temps d'impact.

3.3.2.6 Découpage de l'espace des situations initiales en zones remarquables

Ce paragraphe se propose d'expliquer comment évolue la probabilité de choc, qui représente la dangerosité d'une situation véhicule-piéton donnée.

Pour qu'il y ait choc à l'instant t , le piéton, assimilé à un point, doit être présent dans le voisinage de choc avant du véhicule, noté $V_{\text{choc}}(\mathbf{P}^{\text{veh}}(t))$.

Sur l'horizon d'observation δt , la zone d'impact potentiel correspond à l'ensemble des voisinages de choc : $\bigcup V_{\text{choc}}(\mathbf{P}^{\text{veh}}(t)), \forall t \in [t_0, t_0 + \delta t]$. L'espace des positions initiales du piéton se découpe en fonction des relations avec la zone d'impact potentiel :

Traversée effectuée : cette zone est sûre, le piéton a déjà traversé devant le véhicule, il ne risque plus de se retrouver dans la zone d'impact potentiel. Les trajectoires des deux mobiles ne se croiseront pas.

Traversée sûre : un piéton initialement situé dans cette région pourra traverser devant le véhicule, sans risque de choc. Les trajectoires des deux mobiles se croiseront, mais la distance minimale entre le piéton et le voisinage de choc ne sera jamais nulle. Le véhicule passera « derrière » le piéton. Les zones de traversée sûre et d'impact potentiel peuvent se recouvrir géométriquement. Elles restent cependant disjointes dans le temps.

Traversée avec choc : un piéton initialement présent dans cette zone se retrouvera, à un moment, dans le voisinage de choc du véhicule et sera heurté. Cela signifie que les trajectoires des deux « mobiles » se couperont et que la distance minimale entre le piéton et le voisinage de choc s'annulera.

Pas de traversée ou traversée derrière le véhicule : un piéton appartenant à cette zone ne remplit pas les critères pour être impliqué dans un choc frontal. Il traversera (éventuellement) derrière la face avant. Pendant l'horizon d'observation, les trajectoires ne se croiseront pas. Cette zone, comme la zone de « traversée effectuée » est disjointe de la zone de choc potentiel.

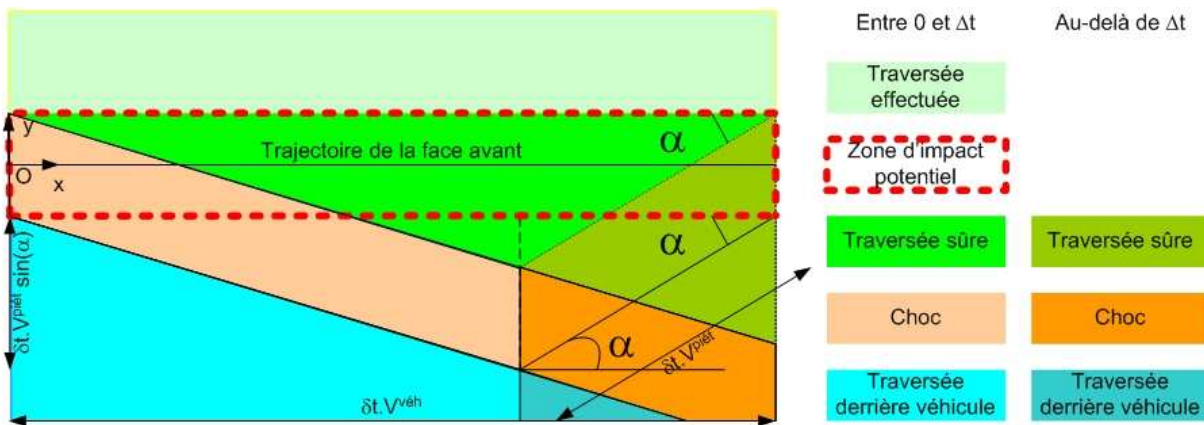


FIG. 3.18 – Découpage du plan en zones de risque.

Pour illustrer ce découpage de façon simple, figure 3.18, le piéton et le véhicule sont supposés avoir des trajectoires rectilignes uniformes, $\forall t \in [t_0, t_0 + \delta t]$.

3.4 Algorithmes de prédiction de chocs

La prédiction consiste à effectuer une décision sur un événement qui n'a pas encore eu lieu (ou dont l'observation n'est pas encore disponible). Dans cette thèse, prédire un choc véhicule-piéton revient à :

1. prédire s'il y aura un choc dans l'horizon de prédiction $[T_{min}^{pred}, T_{max}^{pred}]$ (détection),
2. le cas échéant, prédire le temps avant impact t_{ti} (estimation),
3. éventuellement, prédire la zone et la vitesse d'impact zip et vi (estimation).

Le § 3.2.2 a décrit trois grandes familles de méthodes de prédiction [118] : nominale, pire cas, et probabiliste. Les méthodes « pire cas » génèrent un nombre important de fausses alarmes, cf. § 3.2.2, et sont écartées. Seules les prédictions de type « nominal », et de type « probabiliste » sont considérées.

Pour réaliser la prédiction, les informations disponibles sur le piéton sont sa position et sa vitesse relatives, cf. § 3.1. Ces estimations sont initialement faites dans le repère du système de détection et d'estimation. Le passage dans le repère face avant \mathcal{R}_{FA} s'effectue facilement et sans perte d'information, ce qui revient à supposer que le véhicule est un corps rigide, et que les positions des centres de repères et leurs orientations relatives sont parfaitement connues à tout moment. Les états cinématiques respectifs du piéton et du véhicule à l'instant t sont notés $E^{piet}(t)$ et $E^{veh}(t)$.

3.4.1 Prédiction « nominale »

Dans le repère fixe \mathcal{R} , pour prédire un éventuel impact, la trajectoire du piéton et celle du véhicule sont supposées, respectivement, rectiligne uniforme et uniformément accélérée. La prédiction est effectuée selon l'algorithme décrit figure 3.19.

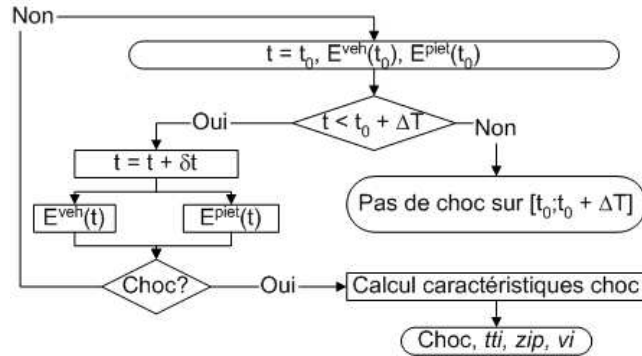


FIG. 3.19 – Algorithme de prédiction de chocs « nominale ».

Les performances de cet algorithme, facile à mettre en oeuvre, sont toutefois vite limitées dès que le piéton et/ou le véhicule ont des mouvements plus complexes que de simples mouvements uniformément accélérés. De plus, il nécessite des calculs de changement de repère pour se ramener dans le repère face avant afin d'évaluer rapidement s'il y a un choc.

Une première simplification de l'algorithme précédent consiste à raisonner sur le mouvement relatif du piéton dans le repère face avant \mathcal{R}_{FA} . Si le véhicule et le piéton avaient des

mouvements uniformément accélérés dans le repère fixe \mathcal{R} , alors le mouvement du piéton dans le repère face avant \mathcal{R}_{FA} l'est aussi. La prédiction suppose que, dans ce repère, le mouvement du piéton est uniformément accéléré :

$$\forall t \in [t_0, t_0 + \Delta T], \mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t_0) + \mathbf{V}(t_0)(t - t_0) + \mathbf{A}(t_0)\frac{(t - t_0)^2}{2}. \quad (3.6)$$

Il suffit alors de tester l'issue de cette trajectoire directement dans le repère face avant \mathcal{R}_{FA} .

Cette méthode est plus rapide que celle reposant sur le repère fixe, alors que leurs performances en terme de prédiction de chocs sont comparables.

3.4.2 Prédiction probabiliste

Les performances de la prédiction « nominale » sont limitées, et ne permettent de couvrir qu'une maigre portion des cas réels. Les méthodes probabilistes semblent mieux adaptées au problème : le comportement complexe des piétons est considéré comme une incertitude sur son évolution. Le but est, pour une situation V-P donnée, d'estimer la probabilité de choc entre l'instant présent, t_0 et l'instant limite de prédiction $t_0 + \Delta T$ et d'estimer les caractéristiques de l'impact : t_{ti} , z_{ip} , v_i .

3.4.2.1 Prédiction des collisions par simulation par Monte Carlo

Estimer la probabilité d'impact d'une situation véhicule-piéton nécessite de prédire les positions du piéton. Les incertitudes sur la trajectoire du piéton sont quantifiées par des distributions de probabilités intégrées au modèle présenté au chapitre 2.

Un couple de trajectoires de véhicule et de piéton, ramenées dans le repère face avant, est appelé « particule ». Pour évaluer les caractéristiques du choc, N particules ayant la même situation initiale sont générées grâce aux modèles de trajectoires de véhicule et de piéton décrits respectivement aux § 3.3.1.4, § 3.3.1.5 et au chapitre 2. À chaque particule i est attribué un poids, $pds(i)$, de sorte que

$$\sum_{i=1}^N pds(i) = 1. \quad (3.7)$$

Les poids sont uniformes dans ce cas. L'issue de chacun de ces couples de trajectoires est évaluée. En cas d'impact, les caractéristiques sont conservées. Puis l'application de statistiques sur les issues de l'ensemble des trajectoires permet d'estimer la distribution des différentes données décrivant le choc et données tableau 3.4.

Nom de la donnée	Code	Valeurs	Unité
Issue	<i>choc</i>	{0 , 1}	sans
Temps avant impact	<i>t_{ti}</i>	[0 , ΔT [ou NA	s
Zone d'impact	<i>z_{ip}</i>	[-50 , 50] ou NA	%
Vitesse d'impact	<i>v_i</i>	[0 , 25] ou NA	m/s
Poids	<i>pds</i>	[0 , 1]	sans

TAB. 3.4 – Description d'une particule et de son issue. NA : non applicable.

Le principe de la prédiction de chocs véhicule-piéton en utilisant une méthode de Monte Carlo est donné figure 3.20.

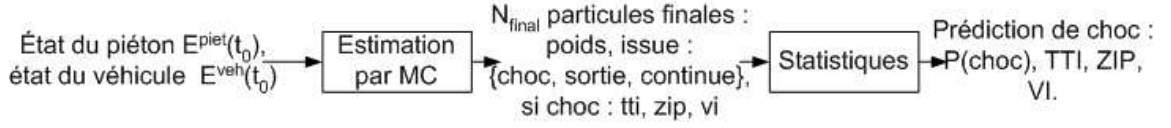


FIG. 3.20 – Prédiction de choc véhicule-piéton par Monte Carlo.

3.4.2.2 Algorithme de prédiction Monte Carlo « primitif »

La première méthode de Monte Carlo, souvent appelée MC « primitif », consiste à traiter les N trajectoires de la même façon, l'une après l'autre, selon l'algorithme décrit figure 3.21, d'une manière très similaire au traitement de la prédiction déterministe.

La trajectoire du véhicule évolue de façon uniformément accélérée, comme lors de la prédiction « nominale ». La trajectoire du piéton est générée par le modèle piéton probabiliste proposé et décrit au chapitre 2.

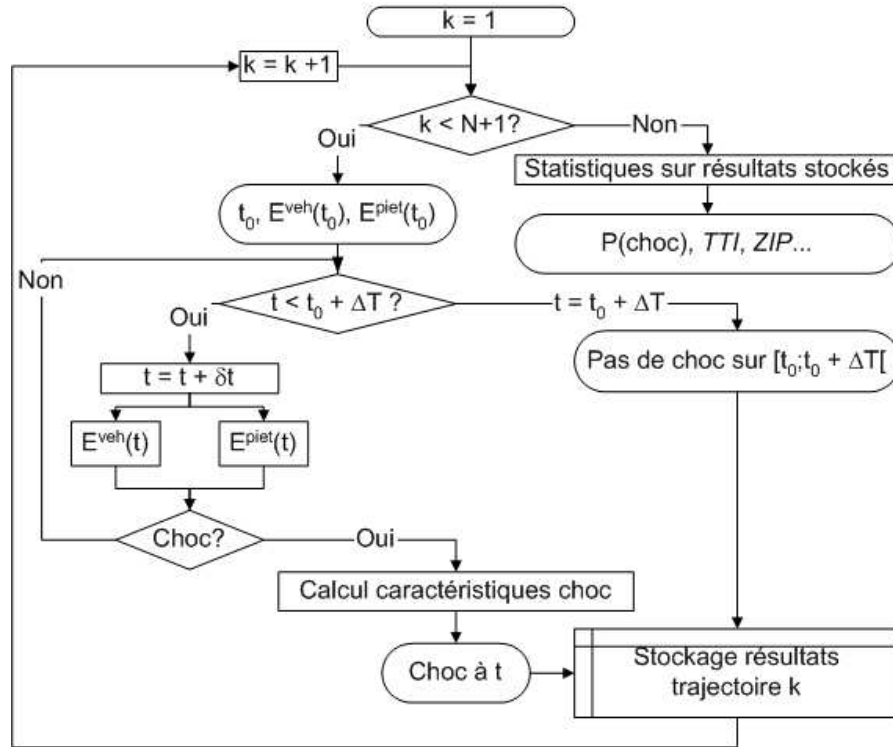


FIG. 3.21 – Algorithme probabiliste de prédiction de chocs (appelé « classique »).

Pour estimer la probabilité de choc entre t_0 et $t_0 + \Delta T$, notée $P(\text{choc}[t_0, t_0 + \Delta T])$, il suffit de faire la somme des poids des particules pour lesquelles la simulation se termine par un choc :

$$P(\text{choc}[t_0, t_0 + \Delta T]) = \sum_{i=1}^N pds(i) \text{ choc}(i) \quad (3.8)$$

Le temps avant impact est estimé de la façon suivante :

$$tti = \sum_{i=1}^N pds(i) choc(i) tti(i). \quad (3.9)$$

Les autres données décrivant l'impact sont estimées de manière similaire ou avec d'autres estimateurs tels la médiane, le mode, un intervalle...

La première mise en oeuvre, figure 3.21, est une extension de la prédiction déterministe.

L'algorithme de Monte Carlo « primitif » présenté au paragraphe précédent comporte deux boucles principales : la première est effectuée sur le nombre de particules, puis, pour chaque particule, une boucle sur la durée est imbriquée. Quelques variantes, au sens informatique, de cet algorithme sont proposées :

Traitement récursif : pour chaque particule, la génération de trajectoire et la détermination de l'issue finale se calculent de manière récursive. La fonction s'appelle elle même, ce qui génère des piles de tailles importantes. Notée « classique 2 », cette méthode traite les données décrivant l'état à l'instant actuel et l'état à l'instant précédent, ce qui la rend particulièrement bien adaptée au test de choc simplifié.

Traitement des trajectoires en parallèle : l'imbrication des boucles de l'algorithme présenté figure 3.21 est modifiable. Cette variante, notée « classique 3 », est proposée figure 3.22. Elle s'avère particulièrement pertinente sur certaines architectures logicielles. Elle nécessite cependant des capacités de stockage et de traitement plus importantes.

La qualité de l'estimation obtenue par des méthodes de Monte Carlo ne dépend pas de la dimension de l'espace exploré, c'est à dire le nombre de variables aléatoires indépendantes qui interviennent dans le calcul [36,128].

La probabilité de choc, $p = P(\text{choc})$ suit une loi de Bernoulli, puisque, pour un couple de trajectoires V-P, l'issue est binaire : un « choc » a lieu avec la probabilité p , ou aucun choc ne se produit, « non choc », avec la probabilité $1 - p$. La méthode de Monte Carlo consiste à réaliser N épreuves indépendantes de la même expérience. Soit X le nombre de cas parmi N se terminant par un choc. X est une variable aléatoire binomiale, son espérance et sa variance valent respectivement :

$$E(X) = Np, \quad \text{Var}(X) = Np(1 - p). \quad (3.10)$$

$p = \frac{E(X)}{N}$. Soit $\hat{p} = \frac{X}{N}$, l'estimation de p , obtenue par la méthode de Monte Carlo. Son espérance et sa variance valent :

$$E(\hat{p}) = p, \quad \text{Var}(\hat{p}) = \frac{p(1 - p)}{N}. \quad (3.11)$$

L'écart type sur l'estimation de la grandeur d'intérêt p , mais aussi tti , zip ou vi , évoluent proportionnellement à $1/\sqrt{N}$.

De Nicolao et al. ont employé les simulations de Monte Carlo pour prédire un choc V-P [108]. Cependant, leurs travaux portaient sur une prédiction en temps différé, éloignée des contraintes temps réel du fait de la valeur de N pour obtenir une précision suffisante.

Le même problème est rencontré avec l'algorithme et le modèle de trajectoires de piétons proposés. Des méthodes de réduction de variance permettent d'améliorer l'efficacité de la méthode proposée et de limiter le temps de calcul sans dégrader la précision sur les estimations.

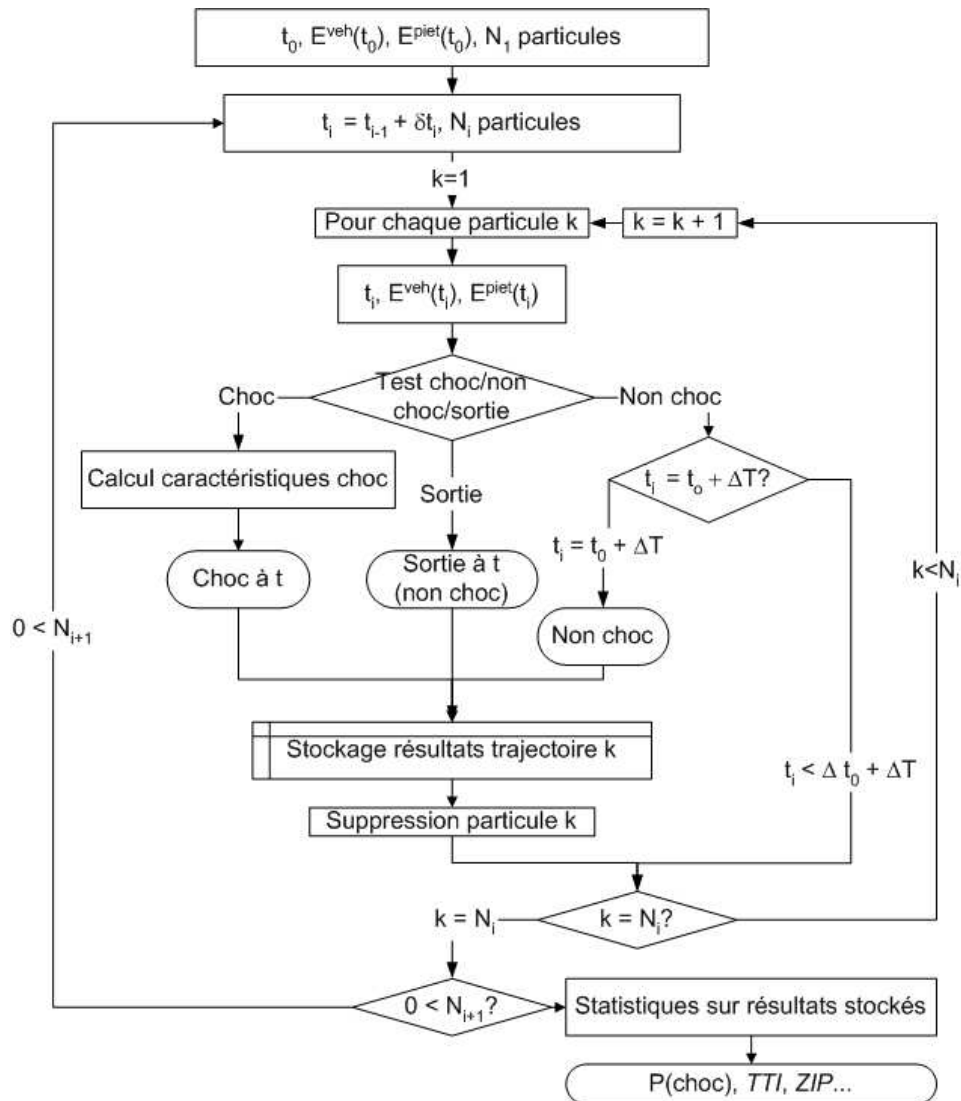


FIG. 3.22 – Algorithme probabiliste de prédiction de chocs (variante « classique 2 »).

3.4.2.3 Monte Carlo « intelligent » : “splitting” et “roulette russe”

Des méthodes de réduction de variance permettent d’améliorer les performances d’un système basé sur des simulations de Monte Carlo. Dans le cas d’une simulation dynamique, les techniques dites de « splitting » et de « roulette russe » permettent d’améliorer les performances de la simulation [128].

La technique de « splitting » et « roulette russe » consiste en un échantillonnage d’importance sur les états. L’espace des états est découpé en régions d’importances I variables. Le découpage doit être soigneusement effectué pour avoir un intérêt. Lorsqu’une particule change de région, le rapport $\beta(t_i) = I(t_i)/I(t_{i-1})$ est calculé, où $I(t_i)$ est l’importance de la particule à l’instant présent et $I(t_{i-1})$ l’importance au pas précédent. L’évolution de la particule dépend de la valeur de $\beta(t_i)$: le processus de décision est détaillé figure 3.23. Seuls les ratios d’importances jouent un rôle : la valeur de l’importance d’une région n’a de sens que par rapport aux importances des régions voisines.

1. si $\beta = 1$: rien n’est fait ;
2. si $\beta < 1$: la roulette russe, la particule a une probabilité de survie de $p = \beta$; deux cas se présentent :
 - (a) elle survit : son poids est alors multiplié par $1/\beta$,
 - (b) elle meurt : son poids devient nul, elle n’est plus utilisée.
3. si $\beta > 1$: splitting, la particule est divisée en $n = g(\beta)$ (avec $n > 1$ et entier, g croissante) particules, et chaque particule est affectée du poids de la particule initiale divisé par n .

FIG. 3.23 – Méthode de « splitting » et « roulette russe ».

Pour la prédiction de chocs véhicule-piéton, les particules qui se retrouvent loin de la zone de choc ne présentent pas vraiment d’intérêt, comme dans le cas d’un piéton traversant loin devant le véhicule (plus de 30 m). Elles auront moins d’importance que des particules qui se retrouvent au voisinage de la zone de choc.

L’algorithme utilisant le « splitting » et la « roulette russe » pour la prédiction de choc véhicule-piéton est décrit figure 3.24. Pour que cette approche soit efficace, les « régions d’importance » doivent être bien adaptées au problème. Une particule est dupliquée lorsqu’elle entre dans une région d’importance plus grande, et réciproquement elle joue à la roulette russe lorsqu’elle entre dans une région d’importance plus faible. Le choix du nombre et de la forme des régions d’importance est l’élément clef d’une telle méthode. Celui-ci se fait essentiellement de manière empirique, puisqu’il n’existe pas à l’heure actuelle de méthode générale pour traiter ce genre de problème de simulation dynamique complexe. Des critères sur les situations V-P définissent des régions d’importance dans le repère face avant instantané.

Dans la première approche, la région d’importance est définie à partir de la distance relative V-P, comme sur la figure 3.25 a. La forme circulaire ne tient cependant pas compte de la différence de vitesses entre le piéton et le véhicule. Supposer que la composante longitudinale de la vitesse relative est due au véhicule et assimiler la vitesse latérale à celle du piéton aboutit à un découpage elliptique, figure 3.25 b.

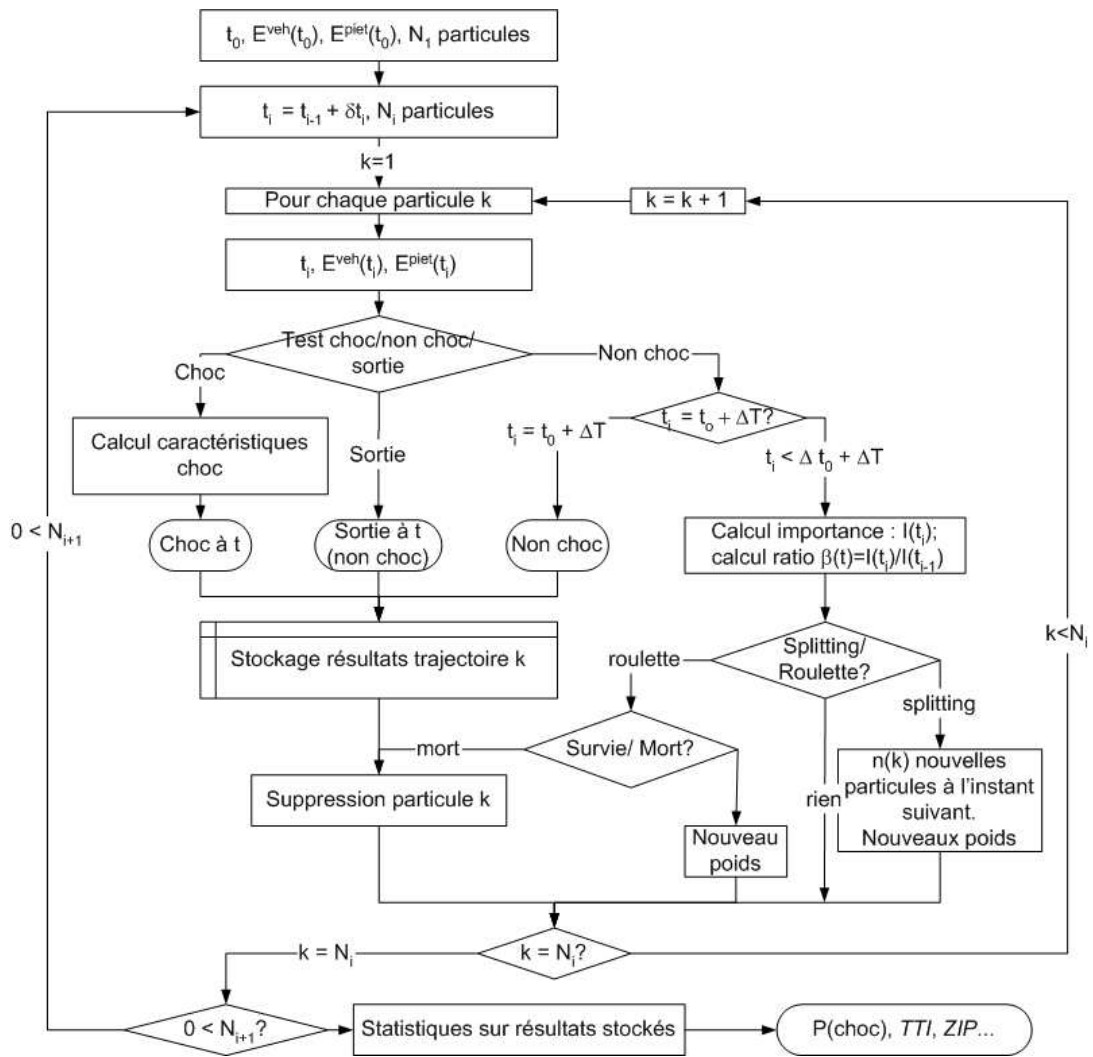


FIG. 3.24 – Algorithme de « splitting » et « roulette russe » appliqué à la prédiction de chocs véhicule-piéton [114].

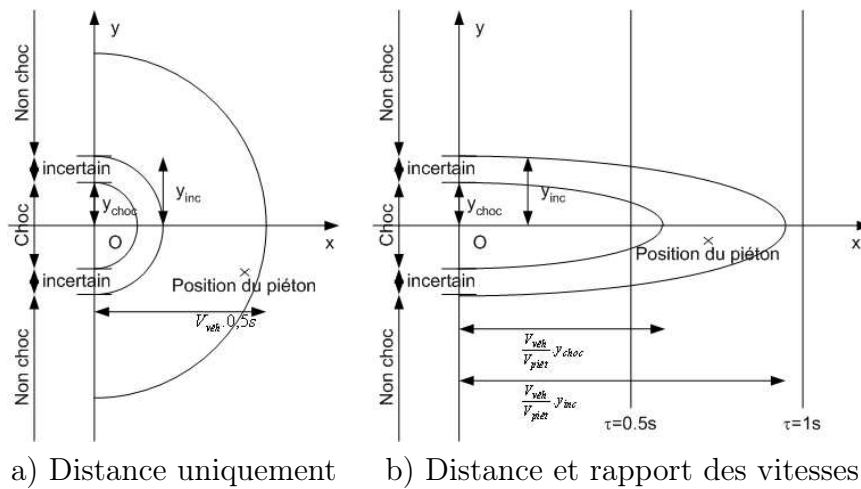


FIG. 3.25 – Monte Carlo intelligent : importance fonction de la distance.

Le calcul de la position radiale à chaque pas de simulation gonfle le volume de calculs et n'est pas compensé par le « splitting ». Les conditions sur la distance doivent être adaptées en fonction de la vitesse. Le « temps avant dépassement », noté τ , est le temps nécessaire pour que la position longitudinale du piéton soit au niveau de la face avant ($x^{piet} \approx 0$) :

$$\tau = \frac{x^{piet}_{FA}}{V_x^{piet}_{FA}}, \quad (3.12)$$

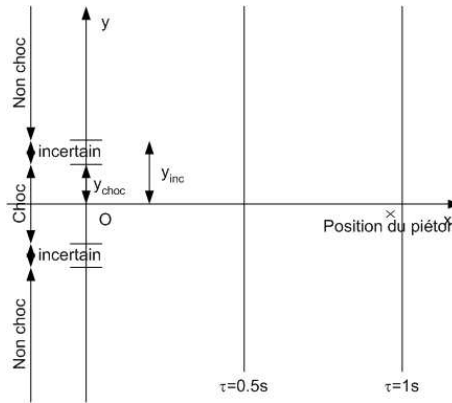


FIG. 3.26 – Monte Carlo intelligent : importance fonction du temps avant dépassement.

Ce découpage, illustré figure 3.26, tient uniquement compte des composantes longitudinales de la vitesse et de la position relative du piéton dans le repère FA . De plus, $V_x^{piet}_{FA}$ est parfois approché par V^{veh} , pour limiter les calculs, en évitant de changer de repère. Ceci pose problème lorsque la trajectoire du piéton n'est pas perpendiculaire à celle du véhicule. De plus, la position latérale du piéton n'est pas prise en compte alors qu'elle a une grande importance, surtout lorsque le piéton est proche du véhicule.

Une autre approche consiste à s'intéresser à la position angulaire du piéton, obtenue par le rapport de sa position latérale sur sa position longitudinale :

$$\theta = \arctan(y/x) \quad (3.13)$$

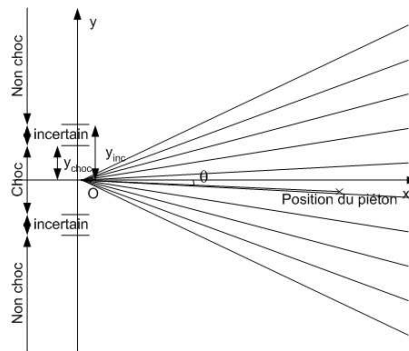


FIG. 3.27 – Monte Carlo intelligent : importance fonction de la position angulaire.

$$\alpha = \arctan \left(\frac{V_y^{piet}}{V_x^{piet}} \right), \quad (3.14)$$

$$\alpha \simeq \arctan \left(\frac{V^{piet}}{V^{veh}} \right). \quad (3.15)$$

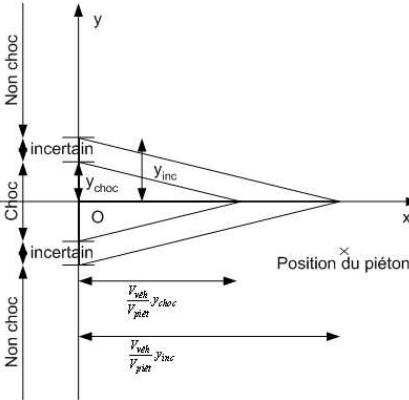


FIG. 3.28 – Monte Carlo intelligent : importance fonction de la direction.

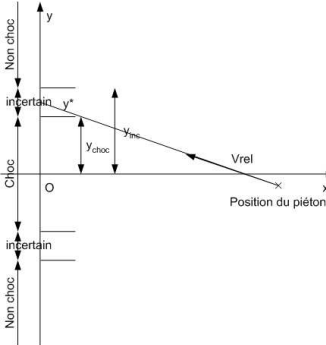


FIG. 3.29 – Monte Carlo intelligent : utilisation de la prédiction déterministe.

Les critères simples décrits plus haut sont limités par leur simplicité. À chaque fois, ils ne sont valides que sur une partie des cas rencontrés. Combiner certains découpages d'importance est profitable. Un premier exemple est l'utilisation de la prédiction déterministe, ce qui revient, figure 3.26, à l'utilisation simultanée de τ et de y^* , qui estime la position latérale du piéton quand sa position longitudinale sera nulle :

$$y^* = y + \tau \cdot V_y^{piet}. \quad (3.16)$$

Des niveaux d'importance en fonction de τ peuvent être définis comme en figure 3.26. Trois niveaux d'importance peuvent, par exemple, être définis en fonction de $|y^*|$:

- $|y^*| < y_{choc}$, importance grande,
- $y_{choc} \leq |y^*| \leq y_{inc}$, importance maximale,
- $y_{inc} < |y^*|$, importance moindre.

Une autre approche, présentée figure 3.30, consiste à utiliser des interprétations contextuelles, comme les notions de début et de fin de traversée.

Les quatre cas correspondant aux signes possibles pour la position et de la vitesse relative latérale du piéton peuvent être ramenés à deux situations :

$V_y^{piet} \setminus y$	$y < 0$	$y > 0$
$V_y^{piet} < 0$	Fin traversée	Début traversée
$V_y^{piet} > 0$	Début traversée	Fin traversée

Lorsque V_y^{piet} et y ont le même signe il s'agit d'une fin de traversée, dans le cas contraire, c'est encore le début de traversée. Le problème étant symétrique par rapport à l'axe des abscisses, seul le traitement pour la partie supérieure ($y > 0$) sera décrit. Avec les mêmes définitions de y^* et de τ que celles choisies plus haut, cela donne :

Fin de traversée

$V_y^{piet} > 0, y > 0$	$0 < y < y_{choc}$	$y_{choc} < y < y_{inc}$	$y_{inc} < y$
$y_{inc} < y^*$	Pas de risque 2a	Pas de risque 2b	Pas de risque 2c
$y_{choc} < y^* \leq y_{inc}$	Risque inc 2a	Risque inc 2b	-
$y^* \leq y_{choc}$	Risque choc a	-	-

avec les notations suivantes :

- Risque inc : risque incertain,
- 1 : avant traversée,
- 2 : après traversée.

Début de traversée

$V_y^{piet} < 0, y > 0$	$0 < y < y_{choc}$	$y_{choc} < y < y_{inc}$	$y_{inc} < y$
$y_{inc} < y^*$	-	-	Pas de risque 1c
$y_{choc} < y^* \leq y_{inc}$	-	Risque inc 1b	Risque inc 1c
$-y_{choc} \leq y^* \leq y_{choc}$	Risque choc a	Risque choc b	Risque choc c
$-y_{inc} \leq y^* \leq -y_{choc}$	Risque inc 2a	Risque inc 2b	Risque inc 1c
$y^* \leq -y_{inc}$	Pas de risque 2a	Pas de risque 2b	Pas de risque 2c

À chaque situation (exemple : risque choc b) est associée une importance. Les situations « risque inc » sont les plus critiques avec la plus grande importance.

FIG. 3.30 – Découpage en régions d'importance avec les notions de début et de fin de traversée.

Les travaux présentés dans ce paragraphe, issus d'une collaboration avec Julien Bect, ont fait l'objet d'un dépôt de brevet [114].

3.4.3 Utilisation du déterminisme par morceaux du modèle piéton

Avec le modèle « de Nicolao », une prédiction de trajectoire avec un pas temporel de δt secondes, pour une durée de ΔT secondes, nécessite de générer $M = \Delta T / \delta t$ couples de variables aléatoires et de réaliser $M - 1$ intégrations pour obtenir la position du piéton au bout de ces

ΔT secondes. La trajectoire obtenue comporte M points de passage. Pour déterminer l'instant d'impact, deux stratégies existent :

1. soit le test choc/non choc est réalisé juste après chaque calcul de position,
2. soit il est réalisé sur L positions successives à la fois, environ $\log(L)$ tests sont nécessaires.

Il en est de même pour la prédiction avec le modèle de piéton proposé au chapitre 2. Le nombre de calculs est même plus important, étant donnée la complexité du calcul analytique de position.

Heureusement, le modèle piéton à quatre états discrets est déterministe par morceaux (§ 2.3.2 et annexe F). Une fois les composantes aléatoires de la trajectoire connues, la trajectoire du piéton s'exprime de façon analytique. Cette propriété permet de réduire sensiblement le nombre de points de passage M à générer et de limiter le nombre de tests de choc à effectuer, comme le montre la figure 3.31.

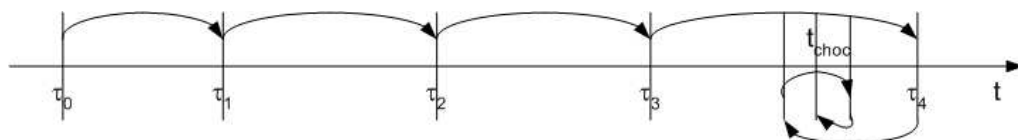


FIG. 3.31 – PDMP : principe de la limitation du nombre d'opérations. Tant qu'il n'y a pas d'impact, la position du piéton est évaluée avec le pas piéton variable (multiples de 0,25 s). Le choc est détecté entre les instants τ_3 et τ_4 . Une recherche par dichotomie permet d'obtenir l'instant de choc avec la précision souhaitée.

3.5 Exemples et résultats

Dans cette partie, quelques exemples de calcul de la probabilité de choc sont présentés, puis l'efficacité des différentes méthodes de prédiction est évaluée.

3.5.1 Exemples de prédiction de choc véhicule-piéton

Les algorithmes décrits dans la partie précédente permettent d'estimer la probabilité de choc d'une situation V-P et les caractéristiques de l'impact éventuel.

3.5.1.1 Probabilité de choc

Nicolao et al. ont établi une cartographie multidimensionnelle qui associe un risque à chaque situation initiale [108]. Un résultat semblable, obtenu avec le modèle piéton à quatre états discrets, est présenté ici.

La probabilité de choc associée à la position du piéton (toutes les autres variables d'état étant initialement égales) est donnée figure 3.32. Il apparaît clairement que le choc est inévitable sur une bande diagonale. Cependant, le caractère probabiliste du modèle de trajectoires de piéton rend continues les transitions d'une zone à l'autre, contrairement au cas théorique exposé au § 3.3.2.6 (cf. exemple de la figure 3.18).

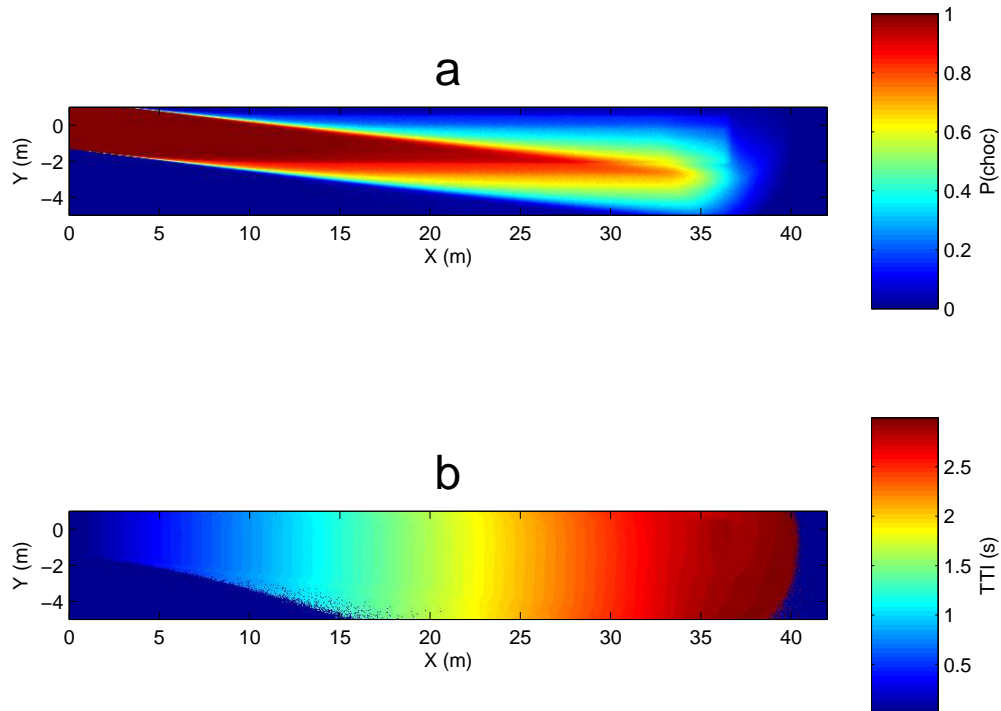


FIG. 3.32 – $P(\text{choc})$ (a) et tti moyen (b) en fonction de la position du piéton. Le véhicule a un mouvement rectiligne uniforme (12 m/s), le long de l'axe des abscisses. Initialement, le piéton marche à 1,5 m/s, perpendiculairement à la vitesse du véhicule, dans le sens des y croissants. Les probabilités de choc et temps avant impact sont calculés sur $x \in [0; 42]$ et $y \in [-5; 1]$ avec un pas de 0,05 m selon les deux dimensions.

3.5.1.2 Exemple de probabilité de choc en fonction de la position longitudinale

La figure 3.33 donne l'évolution de la probabilité de choc en fonction de la position longitudinale du piéton. Trois des quatre zones principales décrites au § 3.3.2.6 sont discernables. La simulation confirme ce que suggère le sens physique. La zone « traversée effectuée » n'apparaît pas, puisque, dans les situations simulées, le piéton n'a pas encore traversé. Ces trois zones sont séparées par des zones de transition :

1. $[0, 5\text{m}]$: « pas de traversée ou traversée derrière le véhicule »,
2. $]5, 12\text{m}[$: zone de transition, rapide, les incertitudes sur l'évolution de la trajectoire du piéton sont faibles,
3. $[12, 27\text{m}[$: zone à fort risque de choc, la probabilité $P(choc)$ ne vaut pas 1, puisque pour quelques trajectoires, peu probables, le piéton se retrouve dans une situation sûre.
4. $[27, 40\text{m}[$: zone de transition, la probabilité de choc décroît lentement, le nombre important de trajectoires possible explique l'étalement,
5. $]40\text{m}, \infty[$: « zone de traversée avant choc », étant données sa position initiale et la vitesse du véhicule, le piéton a le temps de traverser sans risque d'être heurté.

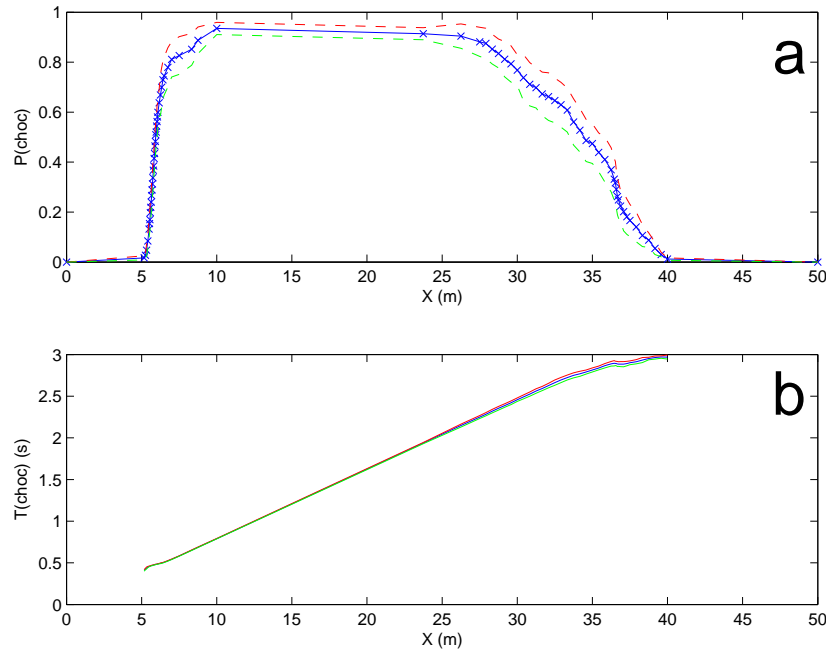


FIG. 3.33 – $P(choc)$ (a) et t_{ti} moyen (b) en fonction de la position longitudinale du piéton. La position initiale relative latérale du piéton est de -2 m, sa position initiale longitudinale est donnée en abscisses. Le véhicule roule tout droit à 12 m/s, le piéton marche initialement à $1,5$ m/s, son orientation est de 90° par rapport à la direction de la voiture. Les courbes rouge et verte délimitent l'intervalle de confiance ($\pm 2\sigma$). Le pas selon X s'adapte pour vérifier que $0.02 < |P(choc)(x_i) - P(choc)(x_{i+1})| < 0.05$.

La connaissance des probabilités de choc a permis de sélectionner des situations initiales et contribué à la réalisation de la base de test décrite au § 4.2.2.2.

3.5.2 Évaluation de l'efficacité des méthodes de prédiction

Les algorithmes de prédiction de chocs sont comparés dans ce paragraphe. L'évolution de la précision de l'estimation en fonction du nombre de particules simulées est étudiée. Elle se mesure en calculant la référence de $P(choc)$ liée aux situations de tests, grâce à un nombre important de simulations (1 million par position). Puis, la prédiction de choc est réalisée (5000 fois) dans les conditions « embarqué » pour chacun des algorithmes à tester. Les résultats obtenus sont comparés à la valeur de référence et l'erreur quadratique moyenne est calculée. Le temps de calcul moyen est également pris en compte.

3.5.2.1 Variantes de l'algorithme « primitif »

La figure 3.34 permet de comparer les performances de deux variantes de l'algorithme de Monte Carlo « primitif ». La version « classique 2 » sera modifiée pour permettre le « splitting/roulette russe ». La version « classique » est légèrement plus rapide qu'avec le mode récursif « classique 2 », pour des erreurs équivalentes.

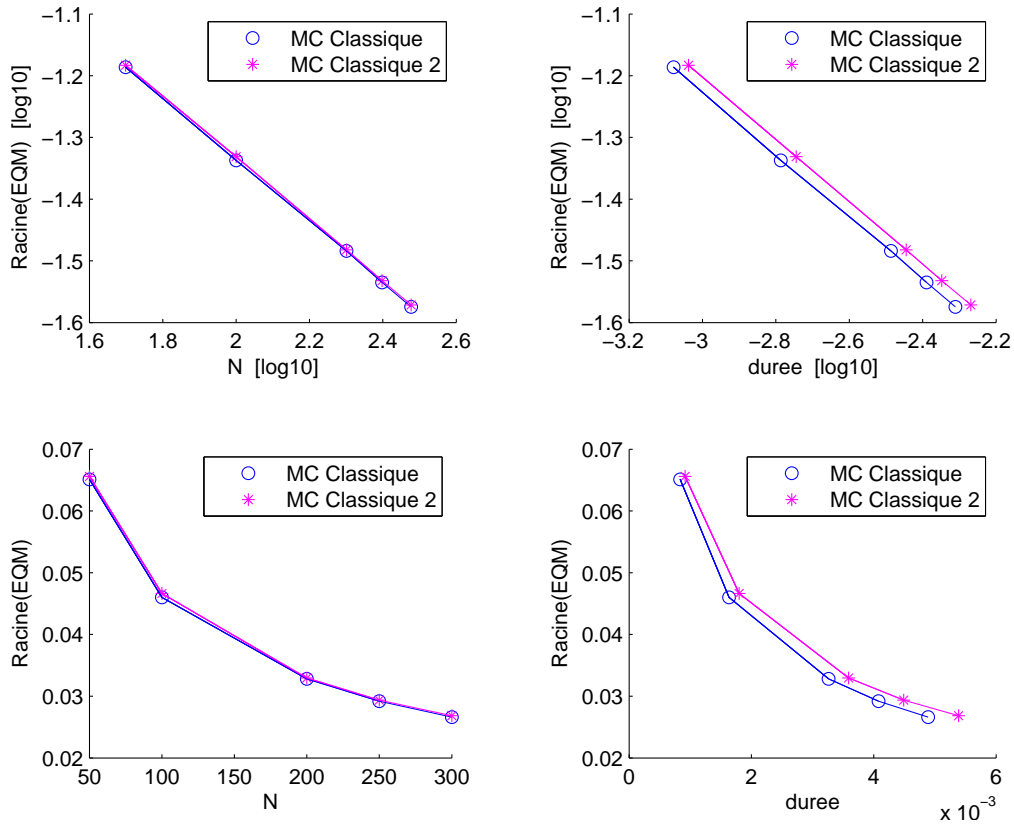


FIG. 3.34 – Comparaison des algorithmes Monte Carlo : « classique » et « classique 2 ».

3.5.2.2 Comparaison des méthodes de « splitting » et « roulette russe »

Différentes méthodes de « splitting » et « roulette russe » ont été évaluées. Pour des raisons de confidentialité pour Renault, les résultats détaillés ne sont pas fournis ici. La figure 3.35

donne un exemple de comparaison de quatre méthodes. Les méthodes A et D sont les plus performantes, alors que B est moins précise et que C est un peu moins précise et plus lente.

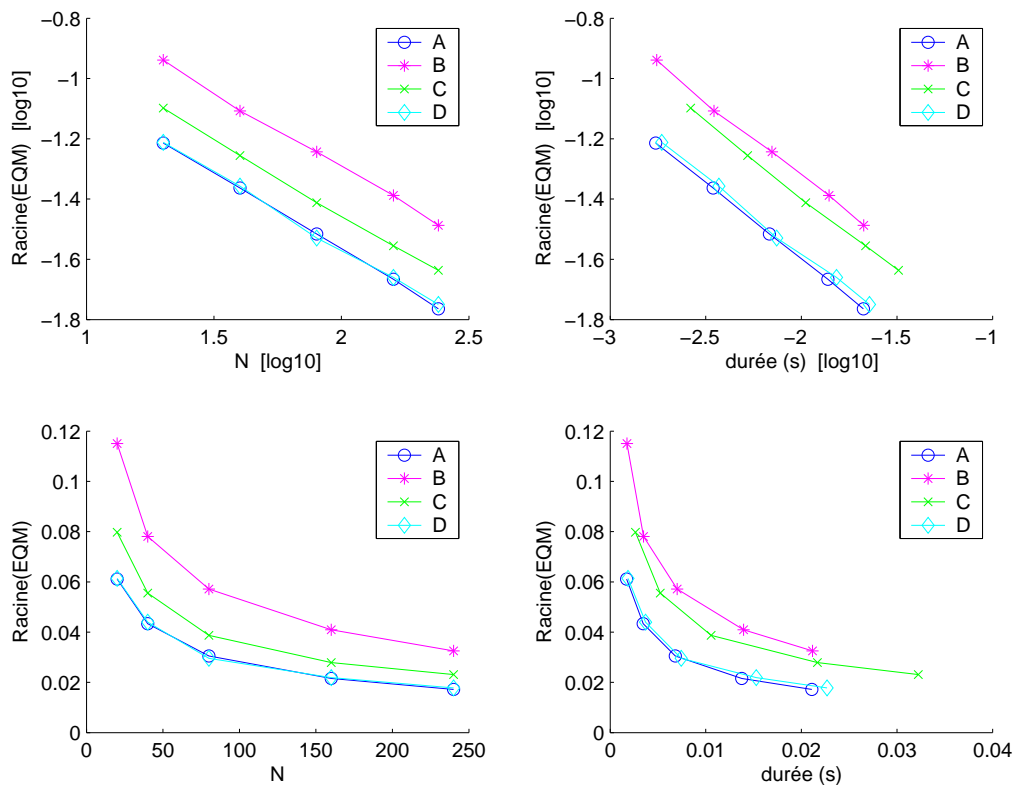


FIG. 3.35 – Comparaison des performances de quatre algorithmes d'estimation des probabilités.

L'apport des méthodes de « splitting » et « roulette russe » n'est pas toujours évident. En effet, déterminer l'importance d'une particule engendre des calculs supplémentaires qui ne sont pas toujours compensés. Des calculs de changement de repère peuvent notamment gonfler le temps de calcul. Enfin, la détermination des rapports d'importance se fait de manière empirique, elle est coûteuse en mise au point, ce qui risque de limiter l'utilisation de telles méthodes.

3.5.2.3 Intérêt de la propriété Piecewise Deterministic Markov Process

L'utilisation de la propriété « déterministe par morceaux » permet effectivement une réduction du temps de calcul, pour une erreur quadratique moyenne sur l'estimation de $P(choc)$ légèrement inférieure (figure 3.36).

3.6 Bilan

Après avoir présenté l'existant dans le domaine de la prédiction de choc entre mobiles en général (cf. § 3.2), et entre un véhicule et un piéton en particulier, certaines définitions et la spécification de la prédiction de choc ont été présentées (§ 3.3). Puis, les algorithmes de

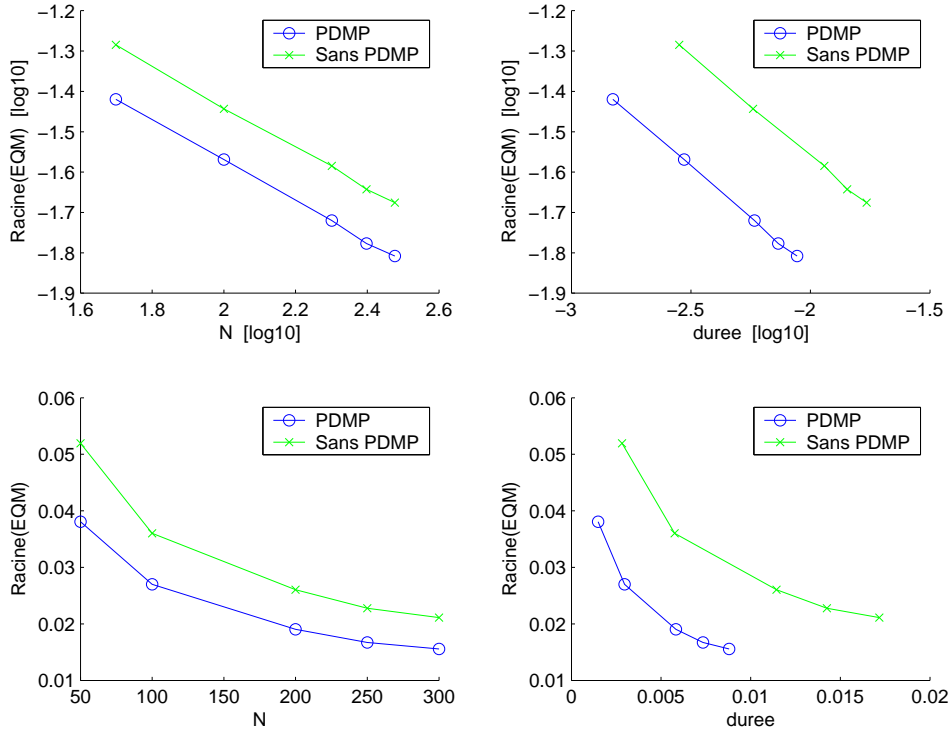


FIG. 3.36 – Intérêt de l'utilisation de la propriété PDMP.

prédiction de chocs, déterministes, ou probabilistes, basés sur le modèle piéton vu au chapitre 2 ont été proposés et discutés au § 3.4. Enfin, quelques exemples de calcul de la probabilité de choc $P(choc)$ et du temps avant impact t_{ti} , ainsi qu'une comparaison des performances de différentes méthodes de prédiction ont été donnés au § 3.5.

L'algorithme d'estimation de la probabilité de choc (et des autres caractéristiques du choc), dans une version optimisée grâce à la propriété « déterministe par morceaux » et à l'utilisation de certaines méthodes de « splitting » et « roulette russe », permet d'améliorer les performances (temps de calcul et précision) de la prédiction.

Chapitre 4

Faisabilité d'un système de prédiction de chocs véhicule-piéton

4.1 Objectifs de ce chapitre

L'application prévue est un système embarqué de prédiction de chocs véhicule-piéton qui déclenche, en cas de danger, des contre-mesures de protection des piétons. Ce système est composé du module de prédiction de chocs, étudié au chapitre 3, qui reçoit en entrée des données fournies par un dispositif de détection de piétons et d'estimation de leurs positions et vitesses relatives. Plusieurs systèmes de détection de piétons sont à l'étude (cf. chapitre), cependant la solution technique qui sera retenue n'est pas encore définie aujourd'hui.

Évidemment, ce système de détection de l'environnement ne sera pas parfait. Une modélisation de ce capteur et des erreurs sur les mesures est proposée.

Ce chapitre s'organise de la façon suivante :

- 4.2 :** Dans un premier temps, le système embarqué de prédiction de chocs véhicule-piéton est présenté. La procédure d'évaluation de ses performances repose sur des simulations et est réalisée de façon quasi automatique.
- 4.3 :** Le système de détection de piétons et d'estimation de leurs positions et vitesses relatives est ensuite examiné. À défaut d'informations détaillées sur les performances de capteurs réels, quelques hypothèses simples permettent d'en décrire le fonctionnement. Ce module de détection et d'estimation fournit les entrées du système de prédiction de chocs.
- 4.4 :** Puis, grâce à l'outil de simulation décrit plus haut, les performances et la robustesse du système de prédiction sont évaluées, en établissant d'abord une référence avec un système de prédiction simple et en supposant les mesures parfaites. L'évolution des performances de la prédiction en fonction de la qualité des mesures est alors suivie.
- 4.5 :** Ce dernier chapitre est conclu par un bilan sur la faisabilité d'un système de détection de piétons pour la prédiction de chocs V-P et par des perspectives d'amélioration.

4.2 Systèmes embarqués de prédiction de chocs véhicule-piéton

Le module de prédiction de chocs réalise, à partir de l'estimation de l'état actuel du véhicule et des piétons éventuellement détectés, une estimation de la probabilité de choc ($P(choc)$) et des caractéristiques de l'impact potentiel (t_{ti} , z_{ip} , vi). Ces informations ne sont pas exploitables telles quelles et nécessitent un dernier traitement pour déterminer les contre-mesures à déclencher. Cette décision est effectuée au sein d'un « module de sélection des contre-mesures ». Une hypothèse simple sur la logique de déclenchement d'une contre-mesure est retenue pour évaluer les performances du système de prédiction.

4.2.1 Modes de prédiction

L'utilisation conjointe de la prédiction et du suivi (tracking) des variables d'état permet, en général, d'obtenir des résultats plus fiables [129]. Dans le cas de la prédiction de chocs véhicule-piéton, connaître la trajectoire du piéton aux instants précédents permet d'estimer la position et la vitesse actuelles avec plus de précision. Cependant, lorsque la détection de piétons est moyennement fiable, ou lorsque le piéton surgit alors qu'il était auparavant masqué, l'information sur l'historique n'est pas disponible.

Avec le modèle « de Nicolao » [108], et celui à quatre états, proposé au § 2.3, la connaissance de l'état actuel suffit pour réaliser la prédiction. Dans l'algorithme de prédiction proposé dans [108], l'utilisation de l'historique (positions et vitesses mesurées aux instants précédents) est plus difficile, puisqu'il n'est pas possible de stocker un grand nombre de trajectoires précises.

Avec le modèle à quatre états [111], connaître la trajectoire aux instants précédents permettrait de connaître le mouvement entre deux instants « piétons », grâce à la propriété de « déterminisme par morceaux » (cf. page 46), sans présager de ce qui se passera au delà de cette phase.

Dans cette thèse, la prédiction de chocs se fait donc avec les informations disponibles à l'état actuel, uniquement. Au sein d'un système embarqué de protection des piétons, l'étape de prédiction de chocs est réalisée selon l'un des deux modes décrits dans ce qui suit.

4.2.1.1 Prédiction en temps réel

La prédiction de choc et l'estimation des caractéristiques de l'impact sont réalisées en ligne. Les résultats obtenus sont précis, puisque l'estimation est effectuée finement à partir des mesures et que l'exploitation de l'historique (donc de l'ensemble de la trajectoire mesurée) est possible.

Ce système repose sur les algorithmes décrits dans la partie précédente (§ 3.4). Malgré les gains apportés par l'utilisation de la propriété « déterministe par morceaux » et de Monte Carlo intelligent, un tel système nécessite une puissance de calcul importante sur chaque véhicule équipé. Pour un piéton, un cycle prend un peu moins de 1 ms pour 250 trajectoires avec un horizon de prédiction de 1 s sur un micro ordinateur récent, de type PC.

4.2.1.2 Prédiction hors ligne

Estimer en temps réel le risque de choc et le temps avant impact est coûteux. Une autre solution consiste à calculer une fois pour toutes, hors ligne, les risque, temps avant impact et autres caractéristiques du choc, à les stocker [108]. Sur véhicule, en temps réel, les valeurs mesurées seront mises en correspondance avec les valeurs les plus proches disponibles en mémoire et qui donneront les informations sur les caractéristiques de l'impact. Plusieurs stratégies existent pour calculer ces valeurs de référence.

Hors ligne, disposer d'une puissance et d'un temps de calcul bien plus importants que dans un système temps réel embarqué est envisageable. Cela permet, en utilisant les mêmes méthodes de Monte Carlo que celles décrites plus haut, d'estimer les caractéristiques de l'impact avec une confiance plus grande.

Les paragraphes suivants explorent des pistes permettant d'optimiser le calcul des probabilités de choc et caractéristiques des impacts.

Limites de la prédiction de position seule : l'annexe I montre des exemples de répartition des positions des piétons après ΔT secondes. Disposer de ces cartes de présence du piéton ne permet toutefois pas de prédire un choc V-P. En effet, raisonner sur des positions uniquement ne permet pas de tenir compte de l'historique et de déterminer le premier instant de contact entre le piéton et le véhicule (cf. § 3.2.3.3). Le recours aux trajectoires est indispensable.

Utilisation des points de passage intermédiaires : avec une méthode de Monte Carlo, pour estimer le risque de choc V-P dans l'horizon ΔT lié à une situation S , et éventuellement le temps avant impact, N trajectoires sont générées et l'issue de chaque trajectoire est obtenue. Or une trajectoire se divise en trajectoires de durées plus courtes, qui commencent sur un point de passage donné et se terminent par la même issue (cf. figure 4.1).

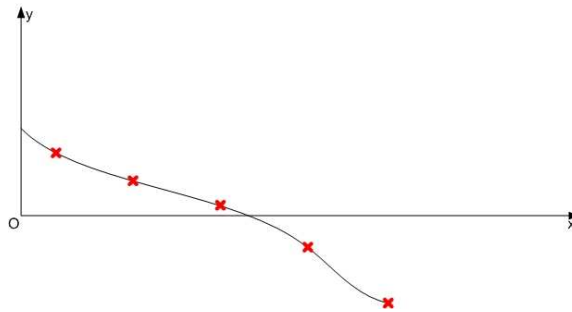


FIG. 4.1 – Trajectoire relative d'un piéton dans le repère véhicule : points de passage intermédiaires.

En partant de l'issue (choc/non choc/continue) de la trajectoire complète et en remontant dans le temps, cela donne un ensemble de situations dont l'issue est connue. Utiliser cet ensemble de « points de passage » permet d'augmenter le nombre de points utilisés pour estimer la probabilité de choc liée à une situation véhicule-piéton.

L'ensemble des informations décrivant la situation actuelle, données tableau 4.1, ainsi que l'issue, tableau 4.2, sont stockées.

Description	Variable
Position relative longitudinale	X
Position relative latérale	Y
Vitesse relative longitudinale	V_X
Vitesse relative latérale	V_Y

TAB. 4.1 – État actuel d'une situation véhicule-piéton.

Description	Variable
Temps restant	t
Issue (choc/non choc/continue)	I

TAB. 4.2 – Issue d'une situation véhicule-piéton.

Puis les situations voisines, c'est à dire celles dont les paramètres d'état instantanés sont proches, sont agrégées en petites classes. Pour celles qui disposent d'un nombre suffisant d'issues associées, la probabilité de chaque issue, ainsi que le temps moyen avant sortie sont calculables. Pour les classes qui ne disposent pas d'un nombre suffisant d'issues prédites, plus de tirages sont nécessaires.

4.2.2 Évaluation et validation de la prédiction de chocs en mode embarqué

Grâce à des simulations de trajectoires véhicule-piéton, des données équivalentes aux entrées du module de prédiction de chocs sont générées. Pour que l'évaluation soit significative, les trajectoires de test doivent être représentatives des cas réels. Ces résultats doivent être dépouillés et comparés à une référence afin d'obtenir une synthèse statistique des performances du système.

4.2.2.1 Simulation de trajectoires véhicule-piéton

Évaluer les performances d'un système de prédiction de choc V-P en conditions réelles n'est pas envisageable. Un outil de simulation, dont les fonctions sont présentées figure 4.2, permet de mener à bien ces tests.

Les comportements des systèmes suivants sont simulés :

- Le piéton, dont les caractéristiques de la trajectoire ont été décrites au § 3.3.1.4.
- Le véhicule équipé se déplace suivant les modèles décrits au § 3.3.1.5.
- La détection de piétons et l'estimation de leur état dont les caractéristiques physiques (zone de détection) et les performances statistiques sont simulées. Dans cette partie, le système est supposé parfait. Une représentation plus réaliste de ce système, qui tiendra compte des erreurs de mesure, sera développée au § 4.3.
- La prédiction de chocs V-P est réalisée par l'un des algorithmes de prédiction déterministe ou probabiliste décrits au § 3.4.
- Une contre-mesure idéale est déclenchée lorsque la probabilité de choc et le temps avant impact remplissent certaines conditions.

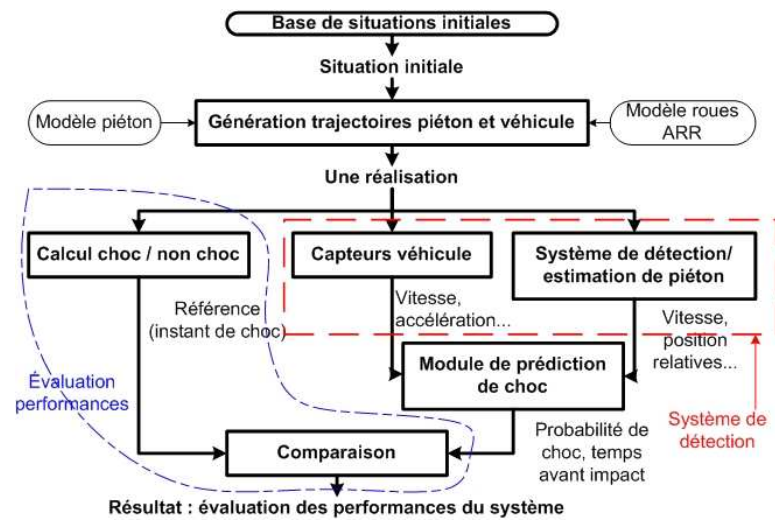


FIG. 4.2 – Schéma fonctionnel de l'outil de simulation / évaluation.

Cet outil a également été utilisé dans le cadre de la mise au point de systèmes de détection pour un brevet sur l'adaptation intelligente des capteurs à leur environnement [130]. Le comportement du système de prédiction de chocs est évalué automatiquement par un module d'analyse des résultats.

4.2.2.2 Bases de test

La reproduction de couples de trajectoires véhicule-piéton accidentogènes permet d'évaluer les performances d'un système de protection de piétons. Pour qu'une base de test soit considérée comme exhaustive, les conditions suivantes doivent être réunies :

- la majorité des accidents véhicule-piéton doit être couverte pour que la base soit représentative des cas réels,
- le nombre de couples de trajectoires doit être suffisamment important pour que l'évaluation soit statistiquement significative,
- le nombre de cas à tester doit rester raisonnable : un compromis entre le nombre d'essais à effectuer et la représentativité doit être trouvé.

Pour l'évaluation, disposer à la fois de trajectoires dont l'issue est un accident et d'autres qui ne se terminent pas par un choc est nécessaire. Cela permet de vérifier que la prédiction est correcte et que le nombre de fausses alarmes est acceptable. Le taux de fausses alarmes d'un système en version presque finale pourra être éprouvé par des essais réels.

L'évaluation des performances d'un système de prédiction de choc est réalisée en comparant la sortie de ce système avec une référence, qui est l'issue « réelle » de la situation-test. Connaître les caractéristiques de l'impact de la situation-test, s'il a lieu, est également nécessaire, ce qui est obtenu en raisonnant sur l'ensemble d'une trajectoire et en tenant compte de son issue . De plus, raisonner sur des situations instant par instant n'est pas très parlant pour un industriel qui s'intéresse surtout aux résultats fonctionnels.

Des accidentologues du CEESAR d'Amiens avaient reconstruit une douzaine d'accidents véhicule-piéton (chapitre 1). Les trajectoires du véhicule et du piéton y ont des mouvements

uniformément accélérés par morceaux, et le piéton a souvent un mouvement rectiligne uniforme. Cette modélisation simple et le nombre limité de cas disponibles ne permettent qu'une évaluation succincte de systèmes de prédiction de chocs véhicule-piéton.

Les scénarios-types d'accidents véhicule-piéton présentés au chapitre 1 permettent de savoir dans quelles circonstances ces accidents se produisent et comment ils se déroulent. À partir de ces données, un ensemble de situations initiales est créé. Des trajectoires de piétons et de véhicules sont générées aléatoirement grâce à des modèles probabilistes. Pour ne pas biaiser les résultats et avantager certaines méthodes, la prédiction de chocs et la génération des trajectoires de test ne sont pas réalisées avec la même combinaison « modèle et paramètre ».

La position du véhicule est fixée arbitrairement à l'origine du repère fixe, et le véhicule est orienté selon l'axe des abscisses : initialement, le repère véhicule et le repère fixe sont confondus. Une situation initiale véhicule-piéton est décrite par les données suivantes :

- durée maximale des trajectoires,
- vitesse initiale du véhicule,
- position initiale du piéton,
- vitesse initiale du piéton,
- orientation initiale du piéton.

L'espace des états a été balayé en insistant sur les cas les plus importants. Les cas moins intéressants : choc évident ou, au contraire, « pas de choc » évident, ont été supprimés. Des situations initiales qui n'aboutissent ni forcément à un choc, ni forcément à un non choc, permettent, en fonction de leur réalisation, d'évaluer le fonctionnement des systèmes dans les deux cas de figures (choc et non choc). De plus, ces situations peuvent parfois aboutir à des cas « limites » : chocs évités de justesse ou simples frôlements, ce qui en fait des cas particulièrement difficiles. La base retenue (figure 4.3) comprend 864 situations initiales. Certains couples de trajectoires-tests sont aberrants ou non adaptés à certains usages : des trajectoires de deux secondes ne permettent pas d'évaluer les performances d'une prédiction dans trois secondes, par exemple. Ils sont alors filtrés.

Paramètres	Unités	Valeurs	Nombre
Durée réelle	s	2	1
Vitesse véhicule	km/h	20 ; 40 ; 60	3
Position longitudinale piéton	m	1 ; 4 ; 4,75 ; 5,5 ; 6,25 ; 7 ; 8,5 ; 10 ; 12,5 ; 16,25 ; 20 ; 25	12
Position latérale piéton	m	-1 ; -2 ; -3 ; -4	4
Orientation piéton	rad	$\pi/4$; $\pi/2$; π	3
Vitesse piéton	m/s	1,5 ; 3	2

TAB. 4.3 – Description de la base de test : une situation initiale est décrite par une combinaison de valeurs.

4.2.2.3 Critère d'évaluation

Le mode de fonctionnement souhaité pour le système de prédiction de chocs, et qui est traité à titre d'exemple, est « de prédire un choc V-P à ΔT ». Cela signifie que, ΔT secondes avant l'impact, le système doit renvoyer une probabilité de choc $P(choc)$ supérieure ou égale au seuil de déclenchement et que le temps avant impact prédit \widehat{tti} doit être correct.

La simulation est discrète par rapport au temps (simulation sur un nombre fini d'instants). La tolérance des contre-mesures vis-à-vis de la précision de l'estimation du t_{ti} doit être prise en compte. Pour répondre à ces deux contraintes, la prédiction est jugée correcte si

$$\widehat{t_{ti}} \in [90\% t_{ti}; 110\% t_{ti}] \quad (4.1)$$

Pour cela, les sorties de la méthode de prédiction de choc (choc/non choc et éventuellement caractéristiques de l'impact) sont stockées et comparées à ce qui s'est réellement passé. Disposer d'une référence est indispensable. Une situation-test V-P, observée pendant une durée déterminée a deux issues : choc à l'instant T_{choc} ou pas de choc. Cette prédiction étant une détection, quatre situations sont possibles (cf. figure 4.4).

Prédiction \ Référence	Pas de choc	Choc à T_{choc}
Pas de prédiction de choc	(Non détection) correcte	(Non détection) fausse
Prédiction de choc	Fausse alarme	Détection correcte

TAB. 4.4 – Comparaison prédiction/référence.

En notant β le taux de détection correcte, α le taux de fausses alarmes et Tx^{choc} le taux d'accident sur la base de test, le taux de fonctionnement correct (pourcentage de cas où le système a un fonctionnement conforme aux attentes) s'écrit :

$$Tx^{corr} = \beta Tx^{choc} + (1 - \alpha)(1 - Tx^{choc}) \quad (4.2)$$

Il permet de mieux évaluer le gain réel d'un système de prédiction de chocs V-P. Ce taux dépend de la proportion d'accidents dans la base de tests. Pour avoir une réelle signification, il faudrait que les événements simulés soient présents dans les mêmes proportions que les événements réels. Cette information n'est pas disponible, et la proportion d'accidents dans les bases de tests est généralement bien plus grande que dans la réalité. En l'absence de système de prédiction, le taux de fonctionnement correct minimum vaut :

$$Tx^{corr} = (1 - Tx^{choc}). \quad (4.3)$$

Une tolérance sur l'erreur relative d'estimation du temps avant impact est autorisée. Les cas où la prédiction de choc n'est pas adéquate alors qu'il y a choc, notés PNA, peuvent être distingués des cas de véritable fausse alerte : le système prédit un choc prédiction de choc alors qu'il n'y en aura pas du tout, notés FA. En effet, si la tolérance sur l'erreur de $\widehat{t_{ti}}$ était plus grande, certains cas PNA seraient classés comme des prédictions correctes. Un autre découpage des situations rencontrées est possible (cf. tableau 4.5). Il permet de mieux rendre compte des performances d'un système, ou de départager des systèmes équivalents au premier ordre. Selon la stratégie de contre-mesure, les cas de « fausse alarme 2 » et/ou de « non détection fausse 2 » peuvent être tolérés.

Le principe du traitement des résultats de prédiction sur l'ensemble de la trajectoire est résumé dans le schéma de la figure 4.3.

Prédiction \ Référence	Pas de choc	Choc à T_{choc}
Pas de prédiction de choc	(Non détection) correcte	(Non détection) fausse
Prédiction de choc :	Fausse alarme	
Prédiction à temps	-	Détection correcte
Prédiction trop tard	-	(Non détection) fausse 2
Prédiction trop tôt	-	Fausse alarme 2

TAB. 4.5 – Comparaison prédiction/référence : influence de la tolérance sur \widehat{tti} .

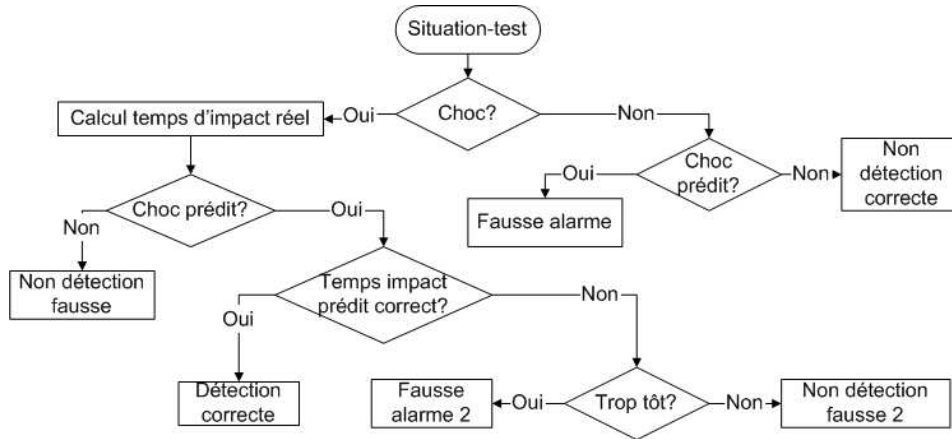


FIG. 4.3 – Traitement et classification des résultats de prédiction.

4.3 Influence des incertitudes sur les observations

Dans la partie précédente, l'étape de détection du piéton et d'estimation de ses données cinématiques était supposée parfaite et la zone de détection infinie. Dans la réalité, les performances d'un système de détection de piétons actuels sont limitées. Une approche simple permettant de prendre en compte les imperfections de la détection et de l'estimation est présentée ci-après.

4.3.1 Modèle de système de détection de piétons

4.3.1.1 Caractéristiques physiques du capteur

Le champ de détection est l'ensemble des positions pour lesquelles le piéton pourra être détecté par le dispositif de détection. Le champ du capteur et le champ de détection effectif sont souvent différents. Par exemple, certains algorithmes de traitement d'image ne permettent pas de détecter les piétons au bord de l'image ou dont une partie du corps n'apparaît pas à l'image [131]. Parmi les formes possibles pour le champ de détection, la pyramide à base rectangulaire est retenue. Sa géométrie est donnée figure 4.4. Le système de détection est décrit par les paramètres suivants :

- intrinsèques :
 - distance minimale de détection, R_{min} ,
 - distance maximale de détection, R_{max} ,

- angle d’ouverture horizontale, θ_H ,
- angle d’ouverture verticale, θ_V ,
- extrinsèques :
 - position dans le repère véhicule, $\mathbf{P}^{capt}_V = (x^{capt}; y^{capt}; z^{capt})$,
 - direction de visée dans le repère véhicule, \mathbf{u}^{capt}_V .

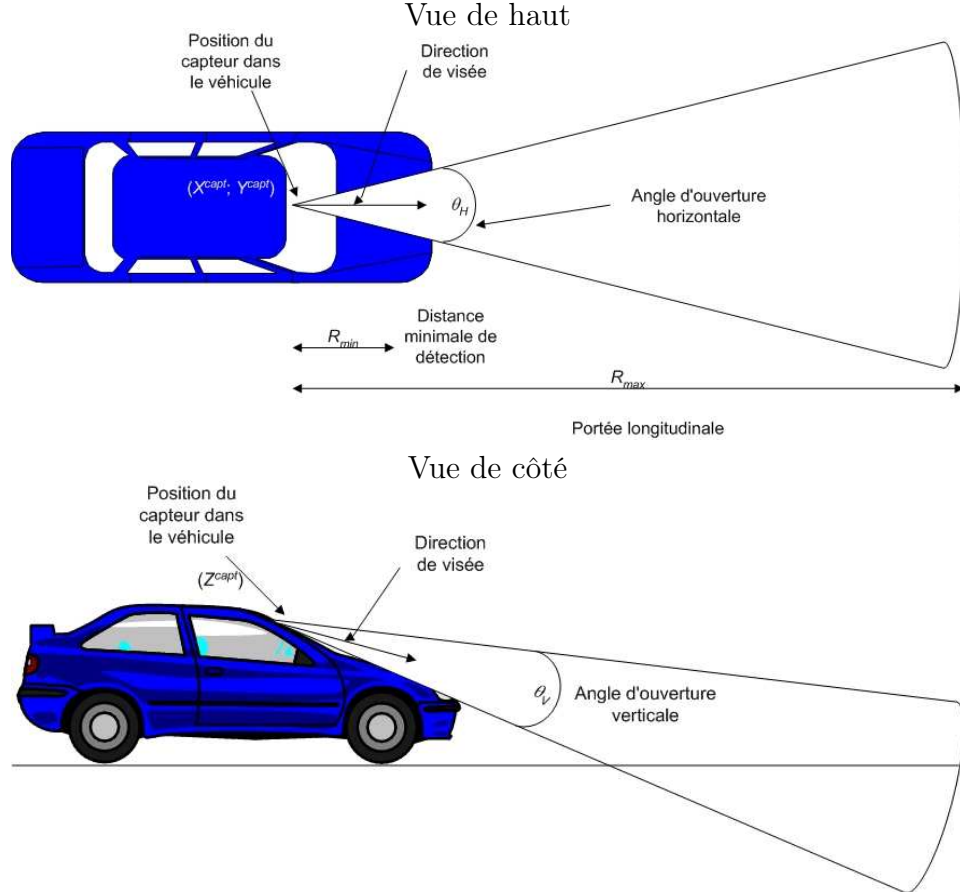


FIG. 4.4 – Champ de détection : géométrie.

Le champ de détection d’un système dépend à la fois des propriétés du capteur et du traitement associé, mais aussi de son implantation dans le véhicule.

4.3.1.2 Caractéristiques de la détection de piétons

La détection est caractérisée par son taux de détection correcte β et son taux de fausse alerte α (cf. annexe A). Le niveau d’information disponible est variable : ces taux peuvent être uniformes quelque soit la situation, ou au contraire dépendre de différents facteurs : par exemple, la position relative du piéton, la vitesse du véhicule, les conditions climatiques... La qualité des résultats est fonction du type de capteur et des algorithmes de traitement employés, mais aussi des conditions extérieures.

Idéalement, il faudrait connaître le couple (α, β) pour toutes les situations réelles. Ceci étant difficile à cause du nombre d’essais à réaliser et de l’absence de système réel à évaluer, la connaissance moyenne de ces taux suffit.

Le module de prédiction de chocs V-P ne fonctionne que si le système de détection de piétons lui envoie des « cibles piéton ». Il est supposé que le système de détection de piétons réalise un suivi et un filtrage temporels (tracking) des piétons qu'il détecte sur une scène, et qu'il est en mesure de détecter parfaitement les piétons. Sinon, il faudra bien sûr pondérer les résultats de la prédiction par la contribution de la détection imparfaite.

4.3.2 Modèles d'incertitudes sur les estimations

Soit $x(t)$ la valeur réelle du signal x à l'instant t , son estimation est notée $\hat{x}(t)$. L'estimation de la position et de la vitesse relative des piétons peut être, comme la détection, entachée d'erreurs. Ces erreurs ne sont pas uniformes et sont le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs. Pour les mêmes raisons que dans le paragraphe précédent, une connaissance précise de la nature des erreurs est impossible et, à l'heure actuelle, seules des hypothèses permettent de progresser.

4.3.2.1 Hypothèses générales

Le système d'estimation renvoie les mesures (position et vitesse relatives) dans le repère FA . Ces données peuvent être sous forme : cartésienne, avec ses composantes longitudinale et latérale, ou polaire, avec une composante radiale et une composante angulaire.

La manière dont le système de détection et d'estimation transforme les mesures brutes en une estimation des données d'intérêt influe sur d'éventuelles corrélations entre les erreurs sur chacune des composantes. Une approche fonctionnelle est retenue dans ce chapitre.

Soit $\epsilon(t)$ l'erreur à l'instant t . Deux modèles de bruit simples sont :

- le bruit de type additif, soit $\hat{x}(t) = x(t) + \epsilon(t)$,
- le bruit de type multiplicatif, soit $\hat{x}(t) = x(t) \epsilon(t)$.

4.3.2.2 Modèles d'incertitudes retenus

Les données sont supposées disponibles en coordonnées cartésiennes et le bruit est pris indépendant sur chacune des composantes de la vitesse et de la position. Il est considéré de type multiplicatif afin de tenir compte du fait que plus le piéton est éloigné du véhicule plus la mesure est imprécise. L'erreur sur chaque composante est multiplicative, soit

$$\hat{x}(t) = x(t) \epsilon(t) \text{ avec } \epsilon(t) = 1 + \omega(t). \quad (4.4)$$

Dans un premier temps, il est supposé que le système de détection et d'estimation évalue les erreurs systématiques et qu'il se met en défaut quand les estimations qu'il renvoie ne sont pas suffisamment fiables (pas de biais sur les mesures). L'hypothèse la plus simple consiste à considérer que l'erreur suit une distribution normale, soit :

$$\omega(t) \sim \sigma_x BBG(0, 1). \quad (4.5)$$

Une hypothèse plus pessimiste est retenue, avec des incertitudes plus dispersées : le taux d'outliers (ou mesures aberrantes, cf. annexe J) est plus important qu'avec une distribution gaussienne. Les outliers spectraux, ponctuellement aberrants, peuvent être éliminés au niveau du module d'estimation grâce à des filtres non linéaires, de type médiane [132].

L'hypothèse retenue ici est que ces filtres ne sont pas parfaits, et que l'erreur $\omega(t)$ suit une loi de Cauchy (cf. annexe J) :

$$\omega(t) \sim \text{Cauchy}(x_0 = 0, \gamma = \sigma_x). \quad (4.6)$$

Le fonctionnement du système est testé, pour différentes valeurs de l'écart-type (ou paramètre d'échelle) σ_x , dans la partie suivante.

4.4 Résultats

4.4.1 Mode embarqué avec détection et estimation parfaites

Les simulations permettent d'évaluer les performances de prédiction sur une base de trajectoires-tests véhicule-piéton.

Les différents modes de réalisation de la prédiction probabiliste par Monte Carlo primitif ont tous les mêmes performances en terme de prédiction. Dans le mode de fonctionnement simulé, le système de prédiction de chocs évalue la probabilité d'impact dans les prochaines 500 ms, pour 250 trajectoires de piétons. Selon les spécifications Renault, le système ne déclenchera de signal de prédiction de chocs que si les deux conditions ci-dessous sont réalisées :

- $P(\text{choc}) \geq \eta$, avec η : seuil à définir,
- $\widehat{tti} = 300 \text{ ms} \pm 10\%$.

À titre d'exemple, les performances obtenues avec les seuils $\eta = \{0,9; 0,95\}$ sont comparées à celles obtenues par la prédiction déterministe, dans le tableau 4.6. Le système déterministe détecte très bien les collisions, mais il génère un nombre inacceptable de fausses alarmes. La prédiction probabiliste, avec un seuil bien choisi (grâce aux courbes COR), prédit un peu moins bien les chocs, mais génère moins de fausses alarmes.

Nombre de cas		9 749	Taux de choc	22,7%
Système	Prédiction correcte	Fausse alarme	Fonctionnement correct	
Déterministe	97,3 %	12,1 %	90 %	
Probabiliste seuil = 0,9	93,1 %	0,2 %	98,3 %	
Probabiliste seuil = 0,95	90,2 %	0,1 %	97,7 %	

TAB. 4.6 – Performances de la prédiction de chocs véhicule-piéton. La définition de la zone de choc pour le calcul de la référence est la même que pour la prédiction de chocs.

Pour la prédiction probabiliste, le test choc/non choc est effectué avec la définition de la figure 3.13 (rectangle et demi-disques sur les petits côtés du rectangle), qui consomme plus de temps de calcul qu'avec la géométrie plus grossière de la figure 3.15 (rectangle, englobant la forme précédente). La prédiction de chocs est moins performante si la référence est calculée avec la forme géométrique fine et que la prédiction utilise la zone plus grossière. Les résultats sont donnés tableau 4.7. Logiquement, les performances sont légèrement modifiées : le taux de prédictions correctes augmente, ainsi que les fausses alarmes. Le gain en temps de calcul est sensible pour la campagne d'évaluation. De plus, un problème similaire risque de se produire dans la réalité : la définition d'un choc réel et celle du système de prédiction ne seront pas identiques.

	Nombre de cas	8 096	Taux de choc	22,3%
Système	Prédiction correcte	Fausse alarme	Fonctionnement correct	
Probabiliste seuil = 0,9	94,5 %	1,6 %	97,5 %	
Probabiliste seuil = 0,95	93,4 %	1,4 %	97,4 %	

TAB. 4.7 – Performances de la prédiction de chocs véhicule-piéton. Pour le calcul de la référence, la zone de choc est plus petite et plus fine que la zone de choc rectangulaire utilisée pour la prédiction.

Les résultats présentés plus haut prouvent qu'il est possible de prédire correctement la grande majorité des accidents V-P quelques centaines de millisecondes avant l'impact. Le comportement de la prédiction en présence d'incertitudes sur les entrées, position et vitesse relatives du piéton, est évalué dans la suite de cette partie.

Afin d'évaluer les résultats de la détection de piétons pour la prédiction de chocs V-P, l'outil de simulation déjà décrit au § 4.2.2 a été mis à contribution. Le champ de détection du système, ainsi que les erreurs sur l'estimation de la position et de la vitesse relatives du piéton sont modélisés et paramétrables.

4.4.2 Caractéristiques physiques du système de détection

La configuration de capteur au champ de détection pyramidal tronqué suivant a été testée :

- champ horizontal de 45°,
- portée de 20 mètres,
- orientation d'arrière en avant, selon la direction longitudinale du véhicule,
- position : (-1,0) dans le repère FA ,

sur plus de six mille trajectoires issues de la base exhaustive de situations-tests, en comparant la prédiction de chocs véhicule-piéton avec le même algorithme, mais avec,

1. d'une part, le capteur décrit ci-dessus, avec détection et estimation parfaites, à condition que le piéton soit présent dans le champ du capteur,
2. d'autre part, la référence des valeurs mesurées par ce même capteur.

Pour une prédiction de chocs V-P à 300 ms, et en supposant que la durée des traitements sur l'ensemble du système de détection de piétons et de prédiction de choc soit négligeable, une telle configuration de capteur est *suffisante* pour une prédiction optimale. Pour un système réel, en trois dimensions, il faudra veiller que la zone réelle de détection correspond bien à l'aire couverte par le capteur.

4.4.3 Performances de la prédiction en présence d'incertitudes sur l'estimation

Les performances de la prédiction de chocs probabiliste en présence d'incertitudes sur les estimations de la position et de la vitesse relatives du piéton sont étudiées dans ce paragraphe. Les incertitudes sont modélisées comme un bruit multiplicatif, décrit dans l'équation 4.4.

Les résultats sont présentés sous forme de courbe COR (Caractéristiques Opérationnelles de Réception), figure 4.5. Chaque courbe donne l'évolution des performances pour différentes

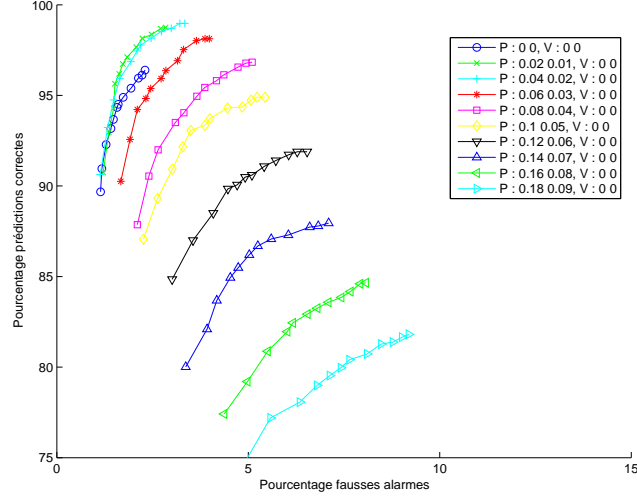


FIG. 4.5 – Courbes COR : prédiction de choc en présence d'incertitudes gaussiennes sur la mesure de la position relative.

valeurs du seuil sur la probabilité de choc, prises entre 0,5 et 1, et pour une configuration des incertitudes $\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{v_x}, \sigma_{v_y}\}$ donnée. Dans ce cas, les incertitudes sur la vitesse sont nulles, $(\sigma_{v_x}, \sigma_{v_y}) = (0, 0)$, celles sur la position évoluent selon $(\sigma_x, \sigma_y) = (2s, s)$, où $s = [0\%, 1\%, 2\%, 3\%, 4\%, 5\%, 6\%, 7\%, 8\%, 9\%]$.

Les taux respectifs de prédictions correctes, β , et de fausses alarmes, α , augmentent lorsque le seuil diminue. La fonction $\beta = f(\alpha)$ est monotone. Comparer la contribution de chaque composante du bruit à la dégradation de la prédiction, revient à suivre l'évolution des performances obtenues lorsque le seuil vaut 0,9.

4.4.3.1 Loi normale sur les estimations de position

L'estimation de la vitesse relative étant supposée parfaite, $(\sigma_{v_x}, \sigma_{v_y}) = (0, 0)$, la contribution des incertitudes sur la position relative du piéton est examinée figure 4.6. Ces incertitudes évoluent selon $(\sigma_x, \sigma_y) = (a_x + b_x s, a_y + b_y s)$, où $s = [0\%, 2\%, 4\%, 6\%, 8\%]$, $\{a_x, a_y\} \in \{0\%, 5\%\}^2$ et $\{b_x, b_y\} \in \{0, 1, 2\}^2$.

Les incertitudes sur la position longitudinale, x , contribuent surtout à diminuer le taux de prédictions correctes. Une mauvaise estimation de la position latérale, y , se solde principalement par une augmentation des fausses alarmes.

4.4.3.2 Loi normale sur les estimations de vitesse

Cette fois, l'estimation de la position relative est parfaite, $(\sigma_x, \sigma_y) = (0, 0)$. Les conséquences d'une mesure imprécise de la vitesse relative sont étudiées figure 4.7. Ces incertitudes évoluent selon $(\sigma_{v_x}, \sigma_{v_y}) = (b_{v_x} s, b_{v_y} s)$, où $s = [0\%, 2\%, 4\%, 6\%, 8\%]$ et $\{b_{v_x}, b_{v_y}\} \in \{0, 5\}^2$.

Comme pour les incertitudes sur la mesure des positions, les erreurs sur la vitesse longitudinale entraînent une baisse des prédictions correctes, alors que celles sur la composante latérale affectent les fausses alarmes.

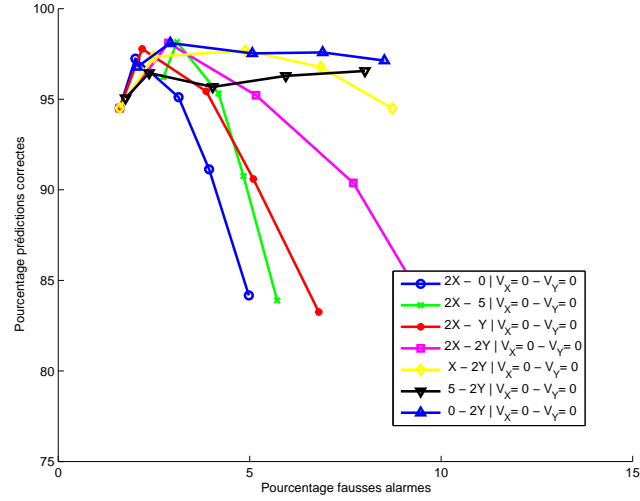


FIG. 4.6 – Performances en présence de bruit gaussien sur les positions.

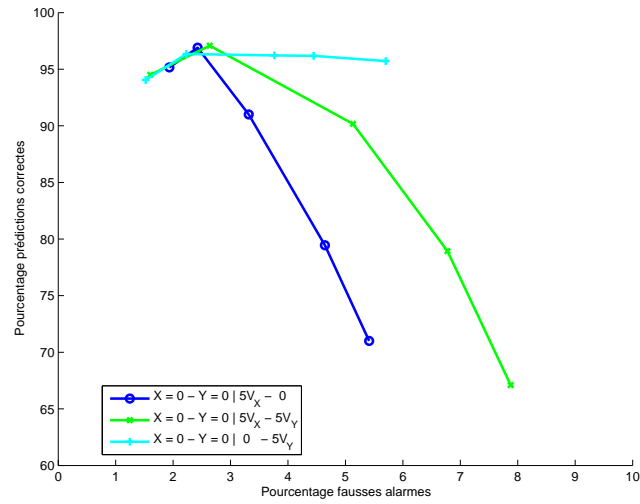


FIG. 4.7 – Performances en présence de bruit gaussien sur les vitesses.

Lorsque les incertitudes sont faibles, les taux de prédiction correctes et de fausses alarmes augmentent simultanément. Les incertitudes sur l'estimation des états futurs compensent une partie des incertitudes sur l'estimation de l'état actuel.

Enfin, les incertitudes sur la vitesse relative longitudinale s'avèrent plus pénalisantes que celles sur la composante latérale. Cette première est composée en grande partie de la vitesse du véhicule, dont l'ordre de grandeur est supérieur à celui de la vitesse du piéton. L'erreur sur l'estimation de la vitesse longitudinale du piéton est plus grande en valeur absolue.

4.4.3.3 Loi normale sur les estimations de position et de vitesse

L'évolution des performances pour une incertitude de $(\sigma_{v_x}, \sigma_{v_y}) = (15\%, 10\%)$, et pour différentes valeurs d'incertitudes sur la position est donnée figure 4.8. Les incertitudes sur les positions évoluent selon $(\sigma_x, \sigma_y) = (b_x s, b_y s)$, où $s = [0\%, 3\%, 6\%, 9\%]$ et $\{b_x, b_y\} \in \{0, 1, 2\}^2$.

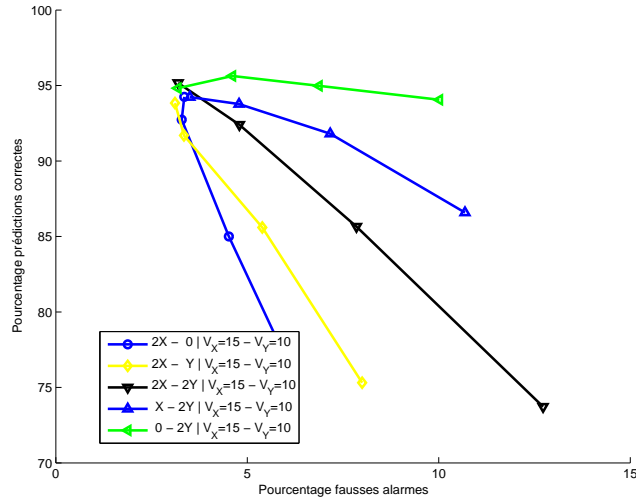


FIG. 4.8 – Performances en présence de bruit gaussien sur les incertitudes sur la position et la vitesse.

Comme prévu, le meilleur point de fonctionnement présente un taux de fausses alarmes plus grand pour un taux de prédictions correctes plus faible que sur la figure 4.6.

Les incertitudes sur les composantes latérale et longitudinale semblent se combiner : la dégradation causée par leurs présences simultanées est plus importante que la contribution de chacune prise séparément.

4.4.3.4 Loi de Cauchy sur les estimations de position

Les performances obtenues pour des estimations d'un bruit ayant une distribution de loi de Cauchy avec différentes valeurs des paramètres σ_x et σ_y dans l'équation 4.6, et pour $(\sigma_{v_x}, \sigma_{v_y}) = (0, 0)$, sont testées.

Les incertitudes sur la position évoluent selon $(\sigma_x, \sigma_y) = (a_x + b_x s, a_y + b_y s)$, où $s = [0\%, 3\%, 6\%, 9\%]$, $\{a_x, a_y\} \in \{0\%, 5\%\}^2$ et $\{b_x, b_y\} \in \{0, 1, 2\}^2$.

La tendance générale est similaire à celle de la figure 4.6. L'augmentation du taux de mesures aberrantes, à $(\sigma_{v_x}, \sigma_{v_y})$ constant, détériore fortement les performances de la prédiction.

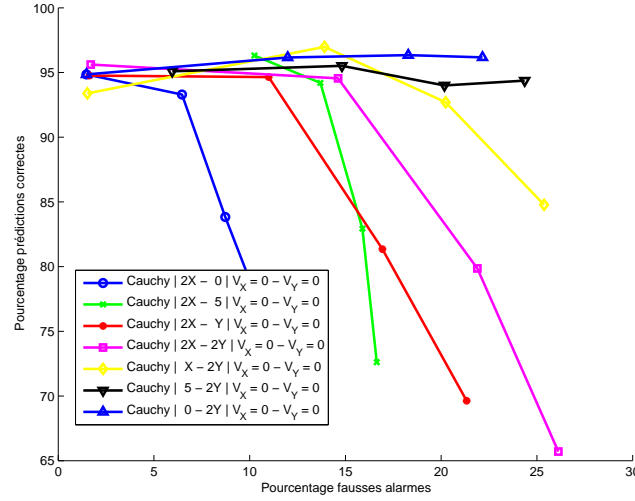


FIG. 4.9 – Performances en présence d'une proportion importante de mesures aberrantes sur la position.

4.4.3.5 Loi de Cauchy sur les estimations de vitesse

Pour une estimation parfaite de la position, $(\sigma_x, \sigma_y) = (0, 0)$, les conséquences d'une mesure imprécise de la vitesse relative sont présentées figure 4.10.

Ces incertitudes évoluent selon $(\sigma_{v_x}, \sigma_{v_y}) = (a_x + b_x s, a_y + b_y s)$, où $s = [0\%, 3\%, 6\%, 9\%]$, $\{a_x, a_y\} \in \{0, 5\}$, et $\{b_x, b_y\} \in \{0, 1, 2\}^2$.

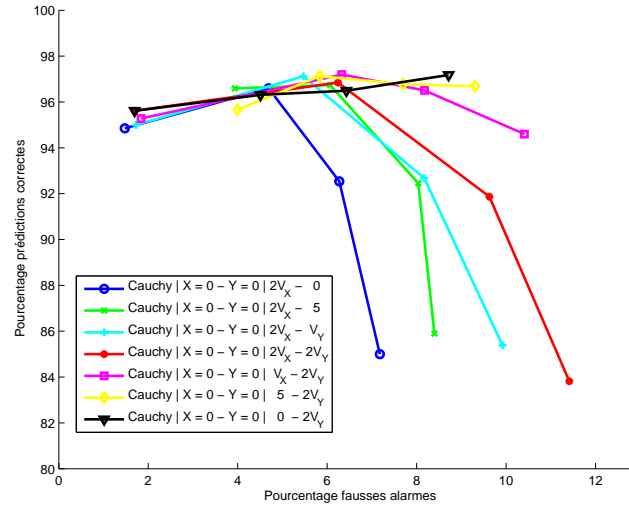


FIG. 4.10 – Performances en présence d'une proportion importante de mesures aberrantes sur la vitesse.

Comme le montrait déjà la figure 4.7, les erreurs selon la direction longitudinale sont plus critiques que sur la composante latérale. Dès que σ_{v_x} ou σ_{v_y} dépasse 5%, le taux de fausses alarmes excède 4%.

4.5 Bilan

Dans ce chapitre, la faisabilité d'un système de détection de piétons pour la prédiction de chocs véhicule-piéton est évaluée. Un dispositif embarqué de prédiction de chocs a été décrit. La prédiction de choc est réalisée en ligne, ou, au contraire, les données nécessaires ont été calculées auparavant. Elles sont alors stockées à bord du véhicule équipé et le risque de choc est obtenu par comparaison avec des situations de référence.

L'évaluation du fonctionnement d'un système embarqué de détection de piétons pour la prédiction de chocs véhicule-piéton est en grande partie réalisable grâce à des simulations. La base de situations tests proposées et l'outil de validation et d'analyse des performances proposé permettent de calculer les performances d'un système de prédiction.

Une formalisation de la forme géométrique de la zone de détection d'un capteur de détection de piéton est proposée. Les incertitudes sur les données en entrée du module de prédiction de chocs sont modélisées par un bruit multiplicatif sur les composantes latérales et longitudinales de la position et de la vitesse relatives du piéton. L'hypothèse d'un bruit de distribution gaussienne est complétée par un bruit ayant une distribution de Cauchy, ce qui permet de traiter le cas où le taux de mesures aberrantes est élevé.

Enfin, les résultats obtenus proposent une configuration acceptable de système de détection de piétons et donnent les performances atteignables pour différentes hypothèses d'erreurs sur l'estimation de la vitesse et de la position relatives du piéton.

Les résultats théoriques obtenus montrent que, même dans des conditions idéales, certains cas de fonctionnements incorrects peuvent être rencontrés, dus à une incertitude sur l'évolution des trajectoires du piéton et du véhicule qui ne seront jamais complètement maîtrisées, et aussi au fait que les piétons ne sont pas des solides rigides et qu'il est difficile de définir exactement un choc véhicule-piéton. Il convient d'en tenir compte pour le choix des contre-mesures. Les performances globales de la prédiction de chocs pourraient être améliorées en mettant en place un suivi temporel afin de limiter l'influence des mesures aberrantes.

Conclusion - Perspectives

6 Bilan

Le propos fondamental de cette thèse est l'étude et la simulation d'accidents véhicule-piéton pour l'évaluation d'algorithmes de prédiction de chocs embarqués au sein d'un système de protection des piétons.

Dans l'introduction, les enjeux liés à la réduction du nombre d'accidents véhicule-piéton ont été présentés. Les principales mesures de protection des piétons ont été comparées. La contribution de cette thèse s'inscrit dans le cadre du pré-crash piéton et concerne la prédiction de chocs.

Afin d'identifier et de délimiter la problématique des accidents véhicule-piéton, ces derniers ont été analysés en profondeur au chapitre 1. Le traitement systématique de 96 procès verbaux d'accidents véhicule-piéton mortels a permis l'enrichissement de la classification initiale de l'INRETS en une base de onze scénarios-types d'accidents et leurs variantes, avec des informations détaillées sur le déroulement du scénario, les circonstances et les facteurs à l'origine de ces accidents. L'analyse de la répartition statistique de ces classes a permis d'extraire trois niveaux de priorités. Le premier niveau de priorité, avec près de 70% des cas d'accidents de piétons mortels, profitera des travaux de cette thèse sur la prédiction de chocs avant véhicule-piéton.

Dans un second temps, le comportement des piétons a été étudié au chapitre 2. Après une synthèse des travaux antérieurs, et en tenant compte des données sur les piétons fournies par un système de détection de piétons, un modèle probabiliste de piéton à quatre états discrets a été proposé. Ce modèle est déterministe par morceaux, ce qui permet de calculer analytiquement la position exacte d'un piéton, une fois les composantes aléatoires connues. Il est suffisamment réaliste pour s'affranchir des trajectoires réelles lors d'une étude exploratoire sur la prédiction de chocs véhicule-piéton. En effet, la majorité des comportements réels de piétons peut être simulée et de plus, tous les cas d'accidents rencontrés au chapitre 1 ont pu être reproduits grâce au modèle.

Une fois le déroulement des accidents et le comportement des piétons connus, et en tenant compte des contraintes issues d'un système de détection de piétons et d'estimation de leurs position et vitesse relatives, la prédiction de chocs véhicule-piéton a été étudiée au chapitre 3. Des algorithmes d'estimation de la probabilité de choc et des caractéristiques de l'impact, réalisés de façon nominale ou probabiliste, ont été proposés. La prédiction probabiliste est réalisée grâce à des simulations de Monte Carlo, qui permettent d'utiliser le modèle de trajectoires de piétons proposé au chapitre 2. L'intérêt d'une méthode de réduction de variance pour les problèmes dynamiques, utilisant le « splitting » et la « roulette russe », est évalué. Le modèle

piéton, déterministe par morceaux, permet d'améliorer l'efficacité de la prédiction de chocs en limitant le nombre de positions à calculer pour déterminer l'issue d'un couple de trajectoires véhicule-piéton.

Enfin, une base de situations tests a été réalisée grâce aux résultats obtenus par l'étude sur les accidents du chapitre 1. En parallèle, un outil informatique permet de simuler des trajectoires de véhicules et de piétons, de calculer l'issue d'un couple de trajectoires, ainsi que le fonctionnement de systèmes de détection de piétons et d'algorithmes de prédiction de choc. L'utilisation de la base de situations-tests avec l'outil de simulation mis en place, génère des situations réalistes. La méthode d'évaluation des performances d'un système complet de détection de piétons pour la prédiction de choc véhicule-piéton permet de spécifier les caractéristiques du système de détection et d'estimation (chapitre 4).

La capitalisation des apports de cette thèse a été réalisée à travers la publication de trois articles scientifiques [57, 58, 111] et le dépôt de cinq brevets [5, 6, 113, 114, 130]. Les avancées au niveau industriel ont été formalisées au sein de Renault sous la forme d'analyses fonctionnelles, de spécifications et tests de validation et ont fait l'objet de pourparlers ou de projets de recherche communs avec des partenaires industriels (Nissan, IBEO, Conti Temic) ou académiques (Université de Parme, laboratoire PSI de Rouen, Centre de Robotique des Mines de Paris).

7 Discussion

Le piéton et les accidents véhicule-piéton est un thème de recherche récent pour l'industrie automobile.

Les accidents de piétons avaient fait l'objet d'études commanditées essentiellement par des organismes publics, tels l'INRETS en France, la NHTSA aux États-Unis, dont le champ d'action est la sécurité routière orientée vers les infrastructures. Les recherches menées par les constructeurs automobiles s'intéressaient plutôt à la phase secondaire des chocs véhicule-piéton. Le chapitre 2 de cette thèse s'est attaqué à la phase primaire, ou pré-crash des accidents de piétons. Les comparaisons avec des études françaises ou américaines ont permis de vérifier la justesse de la classification et de l'importance statistique des scénarios-types de priorité 1. Cependant, ces résultats ne concernent que la France, et dans une moindre mesure, les États-Unis. Une étude dans d'autres pays permettrait de nuancer les statistiques et le poids de certaines classes. De plus, des corrélations entre les cultures, les habitudes de mobilités, la qualité des infrastructures au sein de chaque région sont susceptibles d'apparaître.

Le modèle de piéton à quatre états discrets, proposé au chapitre 2, utilise des paramètres qui sont difficilement mesurables avec précision, comme les probabilités de changement de direction. Dans cette thèse, quelques hypothèses ont été prises et il a été vérifié que les trajectoires obtenues avec différents jeux de paramètres sont suffisamment réalistes. Il serait intéressant de disposer d'un système de mesure automatique de trajectoires de piétons, à l'image de ce qui a été réalisé dans [68], afin d'affiner la connaissance des paramètres et éventuellement de modifier la structure du modèle pour plus de réalisme.

Au chapitre 3, l'estimation de la probabilité de choc véhicule-piéton a été réalisée avec une prédiction nominale de la trajectoire du véhicule. L'objet de la thèse étant d'étudier l'apport du modèle piéton, cette hypothèse était acceptable. Cependant, quand l'horizon de

prédiction augmente ou quand les variations de vitesse du véhicule sont violentes, la prédiction nominale atteint vite ses limites. Pour aboutir à un système industriel, il faudra se pencher sur la prédiction de trajectoire du véhicule équipé. Les algorithmes de prédiction de choc ne se servent que des informations disponibles à l'instant présent, sans tenir compte de l'historique. Or cela pourrait rendre l'estimation de la position et de la vitesse actuelle, mais aussi de la probabilité de choc plus robustes.

Enfin, au chapitre 4, en l'absence de données sur la nature des incertitudes réelles, l'hypothèse de bruit multiplicatif a été retenue. Lorsqu'un système de détection de piétons et d'estimation de leurs positions et vitesses relatives sera suffisamment fiable, il sera intéressant d'étudier la nature et les propriétés des erreurs de mesure. Au sein de l'algorithme de prédiction de chocs, le test choc/non choc a été réalisé avec des formes géométriques simples, et en supposant les dimensions du piéton connues et fixes. La réalité est plus complexe, et il faudra intégrer des incertitudes supplémentaires dues à la disparité des piétons et de leurs postures.

8 Perspectives

Le champ d'utilisation du modèle de trajectoires de piétons peut s'étendre à d'autres domaines, tels l'étude de groupes de piétons, les jeux vidéos. Moyennant quelques adaptations, il est envisageable d'utiliser ce modèle pour le rendre plus « intelligent », capable d'interagir réellement avec son environnement.

Un modèle probabiliste similaire à celui des piétons à quatre états discrets pourra être adapté pour décrire le comportement d'une automobile. Dans le cas du piéton, chaque état correspond à une allure dont découlent des lois statistiques sur la vitesse et le changement de direction. Dans un véhicule à moteur, le rapport de vitesse joue un rôle similaire.

Les systèmes de détection de piétons et d'estimation de leurs positions et vitesses relatives sont en cours de développement : un grand nombre de prototypes existe, mais aucun ne remplit les spécifications pour l'instant. La possibilité de détecter de manière suffisamment fiable et robuste les piétons et d'estimer correctement leurs positions doit être étudiée.

Les résultats obtenus sont à l'origine d'une autre thèse CIFRE lancée par Renault, commençant en octobre 2005, et portant sur la détection de piétons par traitement d'images. Cette dernière a pour but d'évaluer et d'identifier et d'améliorer les dispositifs répondant à la spécification industrielle, en s'appuyant sur de nombreux travaux sur la détection de piétons par traitement d'images, comme [131].

La contre-mesure de protection des piétons envisagée doit être étudiée plus en détail, et son intérêt doit être confirmé. Le dispositif de prédiction de chocs pourra être remanié une fois les choix industriels et stratégiques cernés. Des essais avec des données réelles seront indispensables pour valider une version embarquée de ce système. Les scénarios-types d'accidents permettront de définir les cas-tests.

Annexe A

Définitions classiques employées dans cette thèse

Dans ce rappel, quelques adaptations ont été réalisées au cours de Gilles Fleury [133].

A.1 Théorie du signal et de la décision

Présentation

La *théorie du signal* est l'étude des signaux (déterministes ou aléatoires) sous la forme d'objets mathématiques modélisant ainsi des phénomènes physiques (déterministes ou aléatoires). Un signal est une fonction du temps et de paramètres d'intérêt, véhiculant une information (pertinente au sens de l'observateur).

La *théorie de la décision* consiste en l'élaboration de modèles statistiques, à partir de connaissances *a priori*, en vue du choix optimal d'une décision (au sens d'un critère à définir), ceci à partir d'observations qui dépendent de paramètres (sur lesquels porte la décision).

Prendre une décision est une opération que les humains effectuent en permanence. Qu'elles soient réfléchies ou intuitives, elles requièrent toutes :

- des hypothèses préalables, regroupées sous le terme d'*a priori*,
- un critère de choix, qui indique déjà la nature de la décision,
- des observations, qui permettent de particulariser l'événement en question.

Types de décisions

Généralement, trois types de décisions peuvent être rencontrés :

la détection de présence est une décision binaire (par exemple, détecter la présence d'un piéton dans une scène),

la classification consiste à associer un événement à un ensemble de configurations en nombre fini (par exemple : classification de l'obstacle détecté : un piéton, une voiture, un vélo, une moto, un poteau, un mur...),

l'estimation est une généralisation de la classification, puisque les espaces des observations et des décisions sont en bijection (estimation de la position relative d'un obstacle par exemple).

Il arrive qu'un problème de décision mêle plusieurs aspects à la fois. Une vision unifiée de ces types de décision assimile la détection à un cas particulier de classification en deux classes (présence ou absence). L'estimation se conçoit comme une généralisation de la classification avec un nombre infini de classes (c'est la valeur de la classe qui est recherchée).

A.2 Qualité d'une décision

Les décisions ne sont en général pas parfaites, l'évaluation des erreurs est nécessaire.

Qualité d'une détection

Lors d'une détection, quatre cas de figure sont possibles. Il sont données dans le tableau A.1. Pour une détection, le couple de probabilités (ou de taux) de fausse alarme (notée α) et de détection correcte (β) seront utilisés. L'utilisation de courbes COR (caractéristiques opérationnelles de réception) permet de choisir le point de fonctionnement optimal. Comme dans pour la majorité des systèmes de détection complexes, la perfection n'existe pas : la sélection d'une solution technique est souvent une affaire de compromis. Selon les spécifications, on préférera privilégier :

- un taux de détection correcte élevé, en contrepartie d'un taux important de fausses alarmes,
- ou au contraire le minimum de fausses alarmes, quitte à rater plusieurs détections.

Un autre moyen de choisir un mode de fonctionnement optimal est décrit au § 3.2.3.2).

Détection \ Réalisation	Au moins un piéton	Pas de piéton
Détection d'au moins un piéton	Détection correcte	Fausse alarme
Pas de détection de piéton	Non détection fausse	Non détection correcte

TAB. A.1 – Détection de présence de piéton : les quatre situations.

Qualité d'une estimation

Pour l'estimation d'une grandeur continue (position, vitesse, par exemple), les deux premiers moments de l'erreur d'estimation sont généralement pris en compte. Ici,

- le premier moment est supposé nul (pas de biais),
- la matrice de covariance centrée doit être de trace minimale.

Annexe B

Accidents véhicules - deux roues non motorisés

B.1 Introduction

Il est intéressant de connaître les répercussions que pourraient avoir les travaux sur une autre catégorie d'usagers vulnérables : les cyclistes. Cette analyse s'appuie sur deux approches. D'abord, des données épidémiologiques, permettent de situer les enjeux. Puis, la description des circonstances des accidents permet d'évaluer la similarité entre les cas piétons et les cas cyclistes.

B.2 Épidémiologie

En 1984, en France, il y a eu deux fois plus de victimes chez les enfants piétons que chez les cyclistes, comme cela est visible sur le tableau B.1 ([134]).

	Tués	Accidentés	% tués
Piétons	259	10 949	2,4
Cyclistes	115	5 035	2,3
Passagers	296	19 104	1,5
Ensemble	670	35 088	1,9

TAB. B.1 – Pourcentage de tués parmi les enfants de 0 à 14 ans impliqués dans les accidents de la circulation, par catégorie d'usagers, en France en 1984.

Des statistiques, reprises dans le tableau B.2, montrent que, aux États-Unis d'Amérique, en 1988, la part des piétons tués est écrasante comparée à celle des cyclistes [37].

Sur l'ensemble des accidents ayant eu lieu en France, en 1994, le nombre de victimes chez les piétons est nettement plus important que pour les cyclistes, surtout au niveau des tués, comme le montre le tableau B.3 [20].

À Paris, en 1991, le nombre total d'accidents impliquant des cyclistes (le nombre d'accidents vélos / véhicules est inférieur à cette grandeur) apparaît négligeable par rapport aux accidents

Piétons	14,73%
Cyclistes	1,95%
Piétons/Vélos	7,5

TAB. B.2 – Répartition des morts victimes de la route en 1988 aux États-Unis d’Amérique.

	Tués	Blessés graves	Blessés légers	Total
Piétons	1 126	5 745	16 065	21 810
Cyclistes	321	1 922	5 507	7 429
Cyclomotoristes	472	4 835	15 237	20 072
Motocyclistes	816	4 750	12 294	17 044
Usagers voitures de tourisme	5 423	21 846	84 895	106 741
Usagers camionnettes, PL et autres	375	1 423	6 313	7 736
Ensemble	8 533	40 521	140 311	180 832
Taux				
Piétons	13,2%	14,2%	11,4%	12,1%
Vélos	3,8%	4,7%	3,9%	4,1%
Piétons/Vélos	3,5%	3%	2,9%	2,9%

TAB. B.3 – Nombre de victimes par mode de déplacement en France, en 1994.

impliquant des piétons (tableau B.4). Toutefois, si dans les années à venir la part d’usagers du vélo comme moyen de transport régulier venait à augmenter (et par conséquent le nombre d’accidents les impliquant), un remaniement des priorités serait à prévoir.

Valeurs absolues	Tués	Blessés graves	Blessés légers	Total
2 roues motorisés	49	351	4 461	4 861
4 roues	23	143	3 061	3 227
Piétons	37	274	2 410	2 721
Vélos	5	15	358	378
Total	114	783	10 290	11 187
Pourcentages	Tués	Blessés graves	Blessés légers	Total
Piétons	32,4	35	23,4	24,3
Vélos	4,4	1,9	3,5	3,4
Piétons/Vélos	7,4	18,3	6,7	7,2

TAB. B.4 – 2001 à Paris : 11 187 victimes d’accidents de la route [135].

La situation aux Pays-Bas fait figure d’exception. Les chiffres sous estimés d’un rapport deux pour les simples accidents corporels (encore plus pour les vélos que pour les piétons) et de cinq à dix pour les collisions à conséquences légères [14]. Le cyclisme, avec quasiment un vélo par habitant, est le moyen de transport privilégié dans ce pays. Le nombre d’accidents

impliquant des véhicules motorisés et des vélos dépasse largement celui des accidents V-P. Par contre, le tableau B.5 montre que, parmi les décès accidentels, la part des vélos reste plus importante, mais dans des proportions beaucoup plus restreintes (environ 90 piétons pour environ 150 cyclistes). De plus, dans certains accidents, les cyclistes peuvent être les seuls usagers.

	Piétons	Vélos
Chocs frontaux véhicules	environ 2000	environ 5000
Gravité (% morts)	4,50%	3%

TAB. B.5 – Pays Bas, données officielles annuelles.

B.3 Typologie des accidents

Ces données concernent les enfants aux Pays-Bas et sont issues de [136].

Déroulement caractéristique des accidents de piétons : l'enfant

1. surgit sur la route (masqué ou pas),
2. ne s'arrête pas avant de traverser,
3. ne regarde pas avant de traverser,
4. court.

Manœuvres lors des accidents de vélos : 1. Croiser la route d'autres véhicules (intersection) :

- chacun avance en ligne droite,
 - Un véhicule arrive de la droite et tourne à gauche.
2. Dépasser d'autres véhicules (arriver par derrière) :
 - chacun continue tout droit,
 - le dépassé tourne à gauche,
 - le dépassant tourne à droite.
 3. Rencontrer d'autres véhicules sur la même voie :
 - chacun avance en ligne droite,
 - un véhicule tourne à gauche.
 4. Choc avec un objet fixe ou une personne :
 - objet fixe,
 - piéton ou animal.
 5. Cycliste surgissant d'une sortie.
 6. Cycliste impliqué tout seul (chute, glissade).

Les principaux types d'accidents véhicules à quatre roues motorisés - cyclistes aux États-Unis, issus de [137] sont décrits ci-dessous :

1. Initialement, le cycliste et l'automobiliste progressent selon des trajectoires parallèles :

- le véhicule tourne ou se rabat sur le passage du vélo (12,1% des cas),
 - le véhicule dépasse le cycliste (8,6%),
 - le cycliste tourne ou se rabat et se retrouve sur la trajectoire du véhicule (7,1%).
2. Initialement, les trajectoires du cycliste et de l'automobiliste se croisent :
- l'automobiliste ne respecte pas la priorité à une jonction (21,7%),
 - le cycliste ne respecte pas la priorité à une intersection (16,8%),
 - le cycliste ne respecte pas la priorité hors intersection (11,7%).

L'ensemble des cas décrits forme 78% du nombre total d'accidents impliquant des cyclistes. Ces cas sont nettement distincts des accidents de piétons.

Ce paragraphe est conclu par quelques réflexions sur les accidents de vélos. Le cycliste sur son vélo (à partir de douze ans) est assujetti aux mêmes règles que les autres véhicules motorisés, d'où des accidents à mi-chemin entre les accidents entre véhicules motorisés (situations de conduite, etc.) et collisions véhicules-piétons (mauvaise visibilité des vélos pour les conducteurs de quatre roues). On note également des similitudes avec les accidents impliquant des motos (comportement plus aléatoire dû à leur « liberté » d'action plus grande que celle des quatre roues). Quelques similitudes existent avec les accidents de piétons, mais l'intersection au niveau des scénarios-types potentiels semble très restreinte.

B.4 Conclusion

La part des piétons impliqués dans des accidents de la circulation est, sauf cas exceptionnel (Pays-Bas), bien plus importante que celle des cyclistes. À cause des différences au niveau du déroulement, un grand nombre d'accidents véhicules-cyclistes ne pourra pas être traité par l'approche détection de collisions véhicules-piétons.

Annexe C

Accidents de rollers

Certaines données présentées sont issues de la synthèse présentée dans [138].

C.1 Épidémiologie

1. 1986 à 1994 : 932 cas recensés (enquête française issue des travaux de l'European Home and Leisure Accidents Surveillance System, Étude sur les accidents de la vie courante dans les services d'urgences de 7 hôpitaux de province en France).
2. 1997-1999 : 2075 accidents de rollers, soit 1.52% des accidents de la vie courante recensés [139]. 91% des accidents sont des chutes, 4% de collisions, soit un nombre égal à 83. Parmi ces 4%, toutes ne sont pas forcément des collisions avec des véhicules.
3. Les accidents impliquant des rollers constituent moins de 1% du total des accidents de piétons [18]. Le cumul rollers + skateboard atteint les 1,8%.

C.2 Législation

Les rollers sont assimilés à des piétons : ils doivent circuler sur les trottoirs, traverser sur les passages piétons, respecter les feux tricolores. Ils n'ont pas le droit de circuler sur la chaussée et pistes ou bandes cyclables.

C.3 Dynamique

Les rollers roulent en moyenne à 15 km/h. En fonction de la dextérité, les accélérations et freinages peuvent être relativement continus ou au contraire très saccadés et changeants.

C.4 Conclusion

Les rollers, lorsqu'ils respectent la réglementation et maîtrisent leurs déplacements, peuvent être considérés comme des piétons « extrêmes ». Dans ce cas, les accidents de la circulation dans lesquels ils sont impliqués devraient être compris dans la base de scénarios-types d'accidents

de piétons. Cependant, la part des collisions de rollers avec des véhicules représente une part très faible de l'ensemble des accidents de rollers. Même si la pratique de ce sport, qui est aussi un moyen de déplacement, tend à se populariser depuis quelques années, l'enjeu ne semble pas justifier d'y consacrer une attention particulière.

Annexe D

Accidents véhicule-piéton : mise à jour

D.1 Scénarios-types de l'INRETS Département MA en 2003

Dans un rapport paru fin 2003, intitulé « scénarios-types d'accidents impliquant des piétons » [60], 374 cas d'accidents issus d'un échantillon représentatif de l'ensemble des procès-verbaux d'accidents impliquant des piétons en France ont été étudiés. L'analyse aboutit à la constitution de scénarios-types d'accidents selon la méthodologie en vigueur à l'INRETS. Les auteurs considèrent que les 20 scénarios-types obtenus (regroupés en 4 groupes génériques), correspondent à 85 % de la population des accidents corporels de piétons recensés. Ces scénarios-types concernent quasi-exclusivement des piétons traversant ou s'engageant sur la chaussée (Tableaux D.1 à D.5).

1	Piéton traversant (souvent un adulte ou un adolescent), initialement masqué par un véhicule stationné ou arrêté	8,6 %
2	Piéton traversant en courant (souvent un enfant dont l'attention focalisée), initialement masqué, souvent par un véhicule stationné	10,4 %
3	Piéton circulant dans une circulation dense, masqué par une file de véhicules arrêtés ou ralentis, souvent en intersection ou à proximité	4,6 %
4	Piéton traversant devant un véhicule arrêté pour le laisser passer, généralement sur un passage piéton	2,8 %
5	Piéton traversant une voie importante, en général nuit ou pluie, piéton souvent alcoolisé, détecté trop tard	5,5 %

TAB. D.1 – Influence déterminante d'une obstruction à la visibilité ou de conditions de visibilité défavorables. Part : 31,9 % [60].

Chaque scénario est présenté par un exposé du déroulement type, un recensement des facteurs accidentogènes et des autres éléments explicatifs, des éléments relatifs aux circonstances de l'accident, des éléments de discussion et des perspectives de prévention correspondantes. Cependant, la contribution potentielle des moyens technologiques susceptibles de suppléer le conducteur n'a volontairement pas été évoquée dans le rapport.

On note plus de similitudes avec des cas répertoriés dans des rapports américains. Cette étude, réalisée dans la continuité de [55], comme l'analyse des PVMs au chapitre 1.

6	Piéton détecté, engage une traversée sans prise d'information, surprenant le conducteur	7,0 %
7	Jeune piéton détecté (souvent avec d'autres, attention captée), s'engage en courant ou soudainement, surprenant le conducteur	7,0 %
8	Conducteur tournant puis heurtant en sortie de carrefour un piéton traversant, souvent non détecté	5,8 %
9	Piéton traversant en confiance sur un passage piéton une infrastructure large ou rapide, détection trop tardive ou anticipation erronée de la part du conducteur	8,6 %
10	Conducteur franchissant un feu rouge/orange, heurte en sortie de carrefour un piéton détecté trop tard	1,5 %

TAB. D.2 – Autres conditions (généralement avec problème de prise d'information, de captation de l'attention, d'attentes, d'anticipation, etc.). Ensemble : 30,1 % [60].

11	Piéton présent sur la chaussée (statique, la longeant, y divaguant), de nuit, hors agglomération ou en petite agglomération, détecté trop tard	4,3 %
12	Piéton présent près d'un véhicule en panne ou accidenté, de nuit, hors agglomération, non vu ou trop tard	1,8 %
13	Piéton sur chaussée, souvent en discussion, souvent recule, se retourne, surprenant le conducteur (ou n'est pas vu)	1,8 %
14	Piéton sortant ou juste sorti d'un véhicule stationné, détecté tardivement ou surprenant le conducteur	1,2 %
15	Véhicule en marche arrière, choc sur piéton non détecté par l'arrière du véhicule	4,6 %

TAB. D.3 – Scénarios-types concernant généralement des piétons présents sur la chaussée, statiques ou se déplaçant (longeant la chaussée, ou manœuvres diverses), ou des piétons sortant d'un véhicule. Part : 9,4 % [60].

16	Véhicule en perte de contrôle, heurte un piéton hors chaussée, ou projette sur lui un véhicule stationné	4,6 %
17	Élément d'un véhicule (lourd), ou de son chargement, se détachant ou se déployant et heurtant un piéton	0,6 %
18	Interaction entre deux véhicules, entraînant une manœuvre d'ajustement puis un choc sur piéton	1,8 %

TAB. D.4 – Scénarios-types avec absence d'interférence *a priori* entre le piéton et le véhicule. Part : 7 % [60].

19	Deux-roues circulant sur un trottoir ou une voie interdite à la circulation, heurtant un piéton	0,6 %
20	Querelle ou rapport conflictuel entre piéton et automobiliste	1,5 %

TAB. D.5 – Contexte particulier Part : 2,1 % [60].

D.2 NHTSA : remise à jour de la classification

Ces travaux, publiés en 2003, consistent en une mise à jour de la classification simple décrite au § 1.3.3 [61]. Les cas analysés proviennent de deux systèmes de recueil de données américains, le FARS (Fatal Accident Reporting System) et le NASS/GES (National Accident Sampling System/General Estimates System). Les scénarios correspondant aux accidents mortels ne sont pas aussi bien documentés que les scénarios correspondant aux accidents corporels, c'est pourquoi seules les 10 classes d'accidents corporels sont retranscrites tableau D.6.

Véhicule	Piéton	En Section courante	En Inter-section	Autres	Total
va tout droit	traverse la chaussée	25 %	19 %	1 %	45 %
va tout droit	s'engage subitement sur la chaussée	15 %	3 %	0 %	18 %
tourne à gauche	traverse la chaussée	0 %	9 %	0 %	9 %
tourne à droite	traverse la chaussée	0 %	7 %	0 %	7 %
va tout droit	le piéton longe la chaussée	4 %	0 %	0 %	4 %
va tout droit	action inconnue	4 %	0 %	0 %	4 %
va tout droit	n'est pas sur la chaussée	2 %	1 %	0 %	3 %
fait une marche arrière		2 %	1 %	0 %	3 %
va tout droit	joue ou travaille sur la chaussée	1 %	0 %	0 %	1 %
Autres		2 %	1 %	3 %	6 %
Total		55 %	41 %	4 %	100 %

TAB. D.6 – Types d'accidents corporels impliquant des piétons aux États-Unis [61].)

- Les quatre premiers scénarios représentent 79 % du total.
- La quasi-totalité des accidents surviennent sur la chaussée.
- 83 % des accidents surviennent en dehors des passages protégés.
- La quasi totalité des accidents en section courante se produit sur des routes droites et planes, avec une limite de vitesse inférieure à 55 mph (88,5 km/h).
- 45 % des accidents en intersection se produisent sur des carrefours à feux, 19 % sur des carrefours équipés de stops ou d'autres panneaux et 36 % sur des carrefours sans signalisations.
- 7 % des piétons et 6 % des conducteurs sont sous influence de l'alcool.
- 19 % des piétons impliqués ont moins de 9 ans. 25 % ont entre 10 et 19 ans.

Des similarités importantes au niveau du déroulement des accidents existent entre les accidents en France et pour ceux se déroulant aux États-Unis vus aux § 1.3.2, 1.3.3 [18,41].

Annexe E

Les onze scénarios-types d'accidents véhicule-piéton

Les onze scénarios-types d'accidents V-P sont donnés dans cette annexe. Les notations et abréviations employées dans ces descriptions sont :

D : Droite.

G : Gauche.

F : Féminin.

M : Masculin.

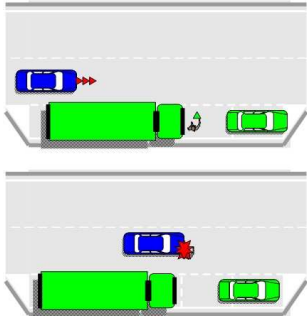
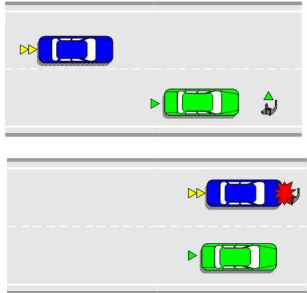
tti **visible** : Temps avant collision à partir duquel le piéton est visible.

Lorsque l'information n'est pas disponible, ND est inscrit dans le champ correspondant. Les « occurrences » sont présentées en fonction de leur importance décroissante. Elles sont parfois précédées d'un nombre : il s'agit du nombre de cas dénombrés parmi les 96 PVM analysés.

Par exemple, dans la description du scénario-type 1, dans le tableau « Conducteur », à la ligne « Sexe » : « 7 M et 1 F » signifie que dans 7 cas le conducteur est un homme et que dans un cas c'est une femme qui conduit. toujours dans la description du scénario-type 1, à la rubrique « Environnement » et pour le champ « Visibilité » : « OK, 1 Soleil gênant », signifie que, dans la majorité des cas, il n'y a pas de problème de visibilité sauf pour un cas où le soleil est gênant.

Les principaux scénarios sont d'abord décrits de façon exhaustive des accidents V-P. Comme il s'agit de cas spécifiques qui ne bénéficieront pas directement d'un système de détection de piétons à l'avant du véhicule pour la prédiction de chocs véhicule-piéton, ils ne sont décrits que sommairement.

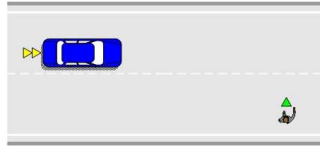

Annexe E. Les onze scénarios-types d'accidents véhicule-piéton

Poids statistique		
INRETS : 21% PVM : 8%		
1a	1b	1c
<i>Le piéton, initialement masqué par un objet fixe (arbre, mur, abribus, panneau, véhicule stationné...), traverse la route en marchant</i>	<i>Le piéton, qui est initialement masqué, parfois accompagné et souvent jeune, surgit sur la route en courant</i>	<i>Le piéton, traverse une voie large, en milieu urbain, le trafic est plutôt dense et hétérogène, il est masqué par des véhicules en circulation ou qui se sont arrêtés pour le laisser passer</i>
	<i>Même configuration que 1a, mais le piéton court</i>	

Piéton		Conducteur	
Âge :	> 45 (1b : < 15) ans	Âge :	< 36 ans
Sexe :	6 M, 2 F	Sexe :	7 M, 1 F
Alcool :	Non	Alcool :	Non
Seul/accompagné :	Seul lors traversée	Manœuvres d'évitement :	Freine ou freine + écart
Allure :	Marche (1b : court)	Zone d'impact :	Gauche
Sens de traversée :	D → G (1c : G → D)		
Vitesse :	[1-2,5] \simeq 1,5 m/s (1b : [3-7,5] m/s)		
Environnement			
Jour/Nuit :	Jour	Conditions atmosphériques :	Normales
Visibilité :	OK, 1 soleil gênant	Masques :	Murs, haies, arbres, véhicules mobiles/fixes
Intersection :	Non	Agglomération :	Oui
Trafic piéton :	De faible à dense	Trafic véhicule :	De faible à dense
Route			
État :	5 normal, 3 mouillée	Largeur chaussée :	[5-10] \simeq 7 m
Profil vertical :	Plat (quelques montées)	Profil longitudinal :	Rectiligne
Cinématique			
Vitesse limite :	< 50 km/h	Vitesse initiale :	[20-70] \simeq 50 km/h
Vitesse impact :	\simeq 30 km/h	t _{ti} visible :	[ϵ -3] s

FIG. E.1 – Scénario-type 1 : piéton masqué traversant hors passage « protégé ».

Poids statistique			
INRETS : 27%		PVM : 18%	

2a	2b
Le piéton, non masqué, traverse hors passage piétons. Le piéton est détecté tardivement voire n'est pas détecté par le conducteur, le véhicule (à 2 ou 4 roues) circule à une vitesse élevée	
en zone urbaine, la voie est large.	en rase campagne.
	
	

Piéton		Conducteur	
Âge :	> 65 ans	Âge :	> 40 ans
Sexe :	9 M, 8 F	Sexe :	12 M
Alcool :	12 Non, 5 Oui	Alcool :	Non
Seul/accompagné :	Seul lors traversée	Manœuvres d'évitement :	Déport, freine après choc, klaxon
Allure :	Marche (lent)	Zone d'impact :	7 D, 3 G
Sens de traversée :	10 G → D (5 D → G)		
Vitesse :	[1-3] ≈ 1,5 m/s		

Environnement			
Jour/Nuit :	Nuit (50% éclairage al- lumé)	Conditions atmosphériques :	12 normales, 4 pluie
Visibilité :	OK	Masques :	Non
Intersection :	Non	Agglomération :	Oui (nb. 2a > nb. 2b)
Trafic piéton :	De faible à dense	Trafic véhicule :	De faible à dense

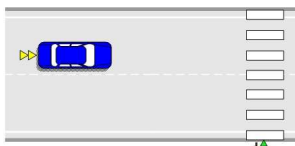

Route			
État :	11 normal, 5 mouillée	Largeur chaussée :	[4-18] ≈ 7 m
Profil vertical :	Plat (quelques descentes)	Profil longitudinal :	Rectiligne (quelques sor- ties de courbes à D)

Cinématique			
Vitesse limite :	2a : 50 km/h 2b : 90 km/h	Vitesse initiale :	2a : [40-60] ≈ 50 km/h 2b : [60-100] ≈ 75 km/h
Vitesse impact :	[20-50] km/h	t _{ti} visible :	[2-5] s

FIG. E.2 – Scénario-type 2 : piéton non masqué traversant hors passage piéton.

Annexe E. Les onze scénarios-types d'accidents véhicule-piéton

Poids statistique
INRETS : 24% PVM : 17%


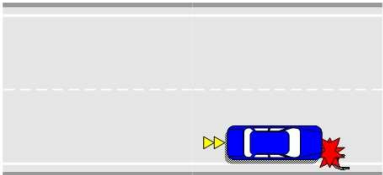
3a	3b	3c
<i>Le piéton traverse sur un passage piéton, souvent à proximité d'une intersection,</i>		
<i>Le véhicule roule à une vitesse importante, le piéton n'est pas ou mal perçu par le conducteur</i>	<i>Le danger est perçu, mais les réactions du piéton et/ou du conducteur sont mal adaptées</i>	<i>Violation du code de la route par le piéton et/ou le conducteur (feu rouge grillé...)</i>
	<i>Le piéton et/ou le conducteur n'a pas mis en place une réaction appropriée (appels de phares, déport du mauvais côté, immobilisation au milieu de la chaussée...)</i>	<i>Même configuration que 3a, mais : le piéton et/ou le conducteur s'est engagé alors que la signalisation (feu) le lui interdisait</i>
		

<i>Piéton</i>		<i>Conducteur</i>	
Âge :	> 65 ans	Âge :	< 36 ans
Sexe :	13 F, 3 M	Sexe :	M
Alcool :	Non (3 Oui)	Alcool :	Non (2 Oui)
Seul/accompagné :	Seul lors traversée	Manœuvres d'évitement :	Freine / klaxon
Allure :	Marche (lent)	Zone d'impact :	Gauche et Droite
Sens de traversée :	D → G et G → D		
Vitesse :	[0.5-2,5] \simeq 1,2 m/s		
<i>Environnement</i>			
Jour/Nuit :	Jour (5 nuit avec éclairage public allumé)	Conditions atmosphériques :	Normales (1 pluie et 1 neige)
Visibilité :	OK, 1 Soleil gênant	Masques :	Véhicules mobiles
Intersection :	Oui	Agglomération :	Oui
Trafic piéton :	Important	Trafic véhicule :	De faible à dense
<i>Route</i>			
État :	Normal (2 mouillée)	Largeur chaussée :	[6-17] \simeq 9 m
Profil vertical :	Plat	Profil longitudinal :	Rectiligne (1 entrée et 1 sortie courbe)
<i>Cinématique</i>			
Vitesse limite :	< 50 km/h	Vitesse initiale :	[20-90] \simeq 45 km/h
Vitesse impact :	\simeq 33 km/h	t _{ti} visible :	[2-6] s

FIG. E.3 – Scénario-type 3 : piéton traversant sur passage piéton.

Annexe E. Les onze scénarios-types d'accidents véhicule-piéton

Poids statistique	
INRETS :	4%
PVM :	9%

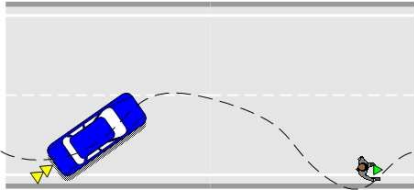
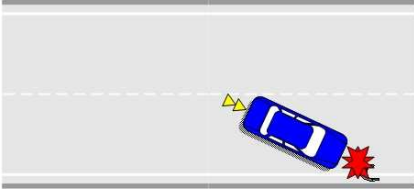
4a	4b
<i>Le piéton longe la voie ou marche sur la chaussée,</i>	
<i>en milieu urbain, le piéton fait, tout à coup, un écart latéral qui l'amène sur la trajectoire du véhicule.</i>	<i>en rase campagne, essentiellement de nuit, le véhicule roule à grande vitesse, le conducteur ne détecte pas le piéton.</i>
	Il y a beaucoup moins de cas 4a que de 4b.
	

<i>Piéton</i>		<i>Conducteur</i>	
Âge :	[20-45] ans	Âge :	[35-55] ans
Sexe :	6 M, 3 F	Sexe :	7 M, 2 F
Alcool :	Non, 3 Oui	Alcool :	Non
Seul/accompagné :	Seul	Manœuvres d'évitement :	Écart
Allure :	Court ou marche (lentement, normalement)	Zone d'impact :	Droite
Côté de la chaussée :	Sur la chaussée ou au bord, D ou G		
Vitesse :	[1-2,5] \simeq 1,5 m/s et [3-6] \simeq 4,5 m/s		
<i>Environnement</i>			
Jour/Nuit :	Nuit (sans éclairage public)	Conditions atmosphériques :	Dégradées
Visibilité :	Problème éclairage	Masques :	Soleil si jour
Intersection :	Non	Agglomération :	Non (nb. 4a \ll nb. 4b)
Trafic piéton :	Faible	Trafic véhicule :	De faible à dense
<i>Route</i>			
État :	5 normal, 3 mouillée	Largeur chaussée :	[7-11] \simeq 7,5 m
Profil vertical :	Plat	Profil longitudinal :	Rectiligne, quelques entrées de courbes
<i>Cinématique</i>			
Vitesse limite :	50 / 90 km/h	Vitesse initiale :	[50-110] \simeq 90 km/h
Vitesse impact :	> 50 km/h	t _{ti} visible :	Très tardif [0-3] s

FIG. E.4 – Scénario-type 4 : Piéton longeant la voie ou marchant sur la chaussée.

Annexe E. Les onze scénarios-types d'accidents véhicule-piéton



Poids statistique			
INRETS :	2%	PVM :	9%

8a	8b
<i>La visibilité est mauvaise, le conducteur a déjà perdu le contrôle de son véhicule, il heurte un piéton, au bord ou hors de la route,</i>	
<i>en milieu urbain, la perte de contrôle s'est produite à une intersection.</i>	<i>hors agglomération, la perte de contrôle a eu lieu dans une courbe.</i>
	
	

<i>Piéton</i>		<i>Conducteur</i>	
Âge :	> 55 [10-82] ans	Âge :	< 33 ans [19-75] ans
Sexe :	7 M, 2 F	Sexe :	5 M, 3 F
Alcool :	Non	Alcool :	Non (2 Oui)
Seul/accompagné :	Seul	Manœuvres d'évitement :	Freine après choc, départ, klaxon
Allure :	Marche, court, immobile	Zone d'impact :	7 D, 3 G
Manœuvre pré collision :	longe la voie, G/D		
Vitesse :	[1-2,5] \simeq 1,5 m/s		
<i>Environnement</i>			
Jour/Nuit :	Jour	Conditions atmosphériques :	Dégradées
Visibilité :	ND	Masques :	ND
Intersection :	Oui (8a), Non (3b)	Agglomération :	Non (3 8a)
Trafic piéton :	De faible à dense	Trafic véhicule :	De faible à dense
<i>Route</i>			
État :	Glissante	Largeur chaussée :	[5-14] \simeq 7 m
Profil vertical :	Plat	Profil longitudinal :	Courbes
<i>Cinématique</i>			
Vitesse limite :	50-70-90 km/h	Vitesse initiale :	[40-110] km/h
Vitesse impact :	ND	t _{ti} visible :	[2-6] s

FIG. E.5 – Scénario-type 8 : perte de contrôle du véhicule, piéton sur trajectoire.


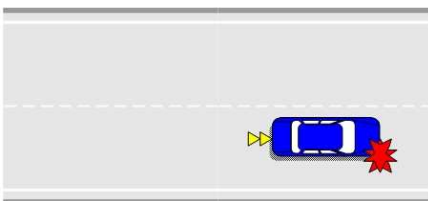
Poids statistique			
INRETS :	ND	PVM :	12%

10
<i>Le piéton, généralement sous l'emprise de l'alcool, traverse, de nuit, sur autoroute. Le conducteur du véhicule, lancé à grande vitesse, a rarement le temps de réagir</i>



<i>Piéton</i>		<i>Conducteur</i>	
Âge :	[30-55]	Âge :	[25-50]
Sexe :	M	Sexe :	M
Alcool :	Oui	Alcool :	Non
Seul/accompagné :	Seul lors traversée	Manœuvres d'évitement :	Freine après choc, déport ou aucune
Allure :	De lente à rapide	Zone d'impact :	7 D, 3 G
Sens de traversée :	6 D → G, 4 G → D		
Vitesse :	[1-3] ≈ 1,5 m/s		
<i>Environnement</i>			
Jour/Nuit :	Nuit sans éclairage public	Conditions atmosphériques :	Normales
Visibilité :	Nuit	Masques :	Non
Intersection :	Non	Agglomération :	Non
Trafic piéton :	Nul	Trafic véhicule :	De faible à dense
<i>Route</i>			
État :	9 normal, 3 mouillée	Largeur chaussée :	[20-21] m
Profil vertical :	Plat	Profil longitudinal :	Rectiligne (3 bretelles entrée ou sortie)
<i>Cinématique</i>			
Vitesse limite :	[90-130] km/h	Vitesse initiale :	[90-150+] km/h
Vitesse impact :	> 70 km/h	t _{ti} visible :	≈ 2 s

FIG. E.6 – Scénario-type 10 : piéton traversant sur autoroute.

Poids statistique			
INRETS :	ND	PVM :	9,5%

11
<i>Le piéton tente de se suicider, ou bien il est gravement sous l'emprise de drogues, de l'alcool, ou de problèmes psychiatriques, ou bien il a été éjecté d'un véhicule (sur accident). Il se retrouve immobile sur la route. Généralement la nuit, rarement en posture debout : allongé, accroupi, il a souvent perdu connaissance. Le conducteur le détecte rarement à temps.</i>



<i>Piéton</i>		<i>Conducteur</i>	
Âge :	[60-65] \simeq 20 ans	Âge :	[20-35] ans
Sexe :	M	Sexe :	M
Alcool :	Oui	Alcool :	Non
Seul/accompagné :	Seul	Manœuvres d'évitement :	Déport, freinage
Allure :	Immobile	Zone d'impact :	Avant bas véhicule, roues
Position :	Chaussée, ou entre chaussée et bord de la route		
Vitesse :	0 m/s		
<i>Environnement</i>			
Jour/Nuit :	Nuit sans éclairage public	Conditions atmosphériques :	normales ou pluie
Visibilité :	Nuit	Masques :	Non
Intersection :	Non	Agglomération :	Non
Trafic piéton :	Faible	Trafic véhicule :	Faible
<i>Route</i>			
État :	Normal ou mouillée	Largeur chaussée :	[6-8] m
Profil vertical :	Plat	Profil longitudinal :	Rectiligne
<i>Cinématique</i>			
Vitesse limite :	[50-110] km/h	Vitesse initiale :	[40-130] km/h
Vitesse impact :	[40-100] km/h	t _{ti} visible :	ND

FIG. E.7 – Scénario-type 11 : piéton allongé ou immobile sur la chaussée.

Scénario	5	6
Titre	Marche arrière	Ouverture de la porte d'un camion
Situation de conduite	Un véhicule est arrêté sur une voie urbaine ou une aire de stationnement	Le camion circule dans des conditions normales
Situation d'accident	Le véhicule est en marche arrière alors qu'un piéton (ou plusieurs) traverse la chaussée ou est immobile derrière lui	En passant au niveau d'un piéton, la porte arrière du camion s'ouvre brusquement
Situation d'urgence	Surprise et pas de réaction pour le piéton, pas de réaction pour l'automobiliste avant le choc	Pas de réaction, choc inévitable
Situation de choc	Le véhicule percute le piéton	La porte frappe le piéton
INRETS	5,3%	1.06%
PVM	2,1%	ND

FIG. E.8 – Scénarios-types 5 et 6. Le nombre de cas rencontrés dans les PVM est très faible. L'essentiel des informations provient de la classification INRETS [55]. Le scénario 5 s'inscrit dans le cadre de la problématique liée au recul d'un véhicule. Ces cas pourront être traités par des systèmes d'aide au parking. Le scénario 6 semble anecdotique et ne nécessite pas la mise en place de systèmes intelligents.

Scénario	7	9
Titre	Conflit « bus - piéton »	Poids lourds
Situation de conduite	Bus ayant l'intention de s'arrêter ou de repartir	Poids lourd circulant en milieu urbain, arrêté ou au ralenti
Situation d'accident	présence d'un piéton, non perçu par le conducteur, sur la chaussée	le piéton traverse devant le train de remorques, généralement sur passage piéton
Situation d'urgence	pas de réactions	aucune, le chauffeur routier n'a rien vu
Situation de choc	le bus heurte le piéton	le PL emporte le piéton
INRETS	1,06%	ND
PVM	3,1%	4,2%

FIG. E.9 – Les scénarios 7 et 9 sont liés spécifiquement aux conditions de visibilité de ces types de véhicules : dimensions importantes, position du conducteur... Certains cas pourraient être traités par un système de détection de piétons pour la prédiction de chocs V-P.

Annexe F

Modèle piéton à quatre états vu comme un PDMP

Cette note a initialement été rédigée par Julien Bect, doctorant au Département Signaux et Systèmes Électroniques à Supélec, en septembre 2004, après une présentation du modèle à quatre états discrets. Elle a été adaptée pour assurer la cohérence des notations.

Le modèle piéton à quatre états, une fois reformulé de manière adéquate, est un processus de Markov appartenant à la classe des PDMP (Piecewise Deterministic Markov Process) introduite par M.H.A. Davis [140]. Il s'agit d'un processus :

1. homogène : les caractéristiques (modèles, paramètres) qui décrivent l'évolution dynamique du processus ne varient pas avec le temps,
2. à temps continu,
3. et prenant ses valeurs dans un espace d'état hybride (au sens où l'état est décrit par un mélange de variables discrètes et de variables continues).

F.1 Données du modèle

On se donne :

- un ensemble discret d'états : $\mathcal{S} = \{ \text{Arrêt, Marche, Course lente, Course rapide} \}$,
- une matrice de transition \mathbf{P} sur l'ensemble \mathcal{S} ,
- une famille de densités de probabilité sur $\mathbb{R}^+ \times]-\pi; \pi]$ $\{ p(v, d\alpha | S), S \in \mathcal{S} \}$,
- une fonction $\tau : \mathcal{S}^2 \longrightarrow \mathbb{R}^+$ qui donne la durée d'un pas de temps $\tau(S, S^+)$ lorsque le mode courant est S et le mode cible S^+ .

F.2 Espace d'état du processus

$S(t) \in \mathcal{S}$	état discret précédent,
$S^+(t) \in \mathcal{S}$	état discret cible,
$\tau(t) \in]0; +\infty[$	temps restant avant la prochaine transition,
$a(t) \in \mathbb{R}$	accélération tangentielle,
$v(t) \in]0; +\infty[$	norme de la vitesse,
$\omega(t) \in \mathbb{R}$	vitesse angulaire,
$\alpha(t) \in \mathbb{R}$	angle,
$p_x(t) \in \mathbb{R}$	position : abscisse,
$p_y(t) \in \mathbb{R}$	position : ordonnée,

F.3 Évolution de l'état du piéton

L'évolution du processus est, comme son nom l'indique, déterministe par morceaux. Cela signifie que, à l'exception de certains instants T_i où se produisent des transitions discrètes, l'évolution de l'état du processus est régie par une dynamique purement déterministe.

Le temps $\tau(t)$ joue le rôle d'un chronomètre qui déclenche une transition discrète dès que le processus a passé un temps $\tau(S(t), S^+(t))$ dans le mode discret $(S(t), S^+(t))$ courant. C'est la seule source de transitions discrètes dans ce modèle (remarquons que l'on parlera de transition discrète même si le mode de déplacement ne change pas, c'est-à-dire $S^+(t) = S(t)$).

Dynamique continue

Les variables $S(t)$, $S^+(t)$, $a(t)$, et $\omega(t)$ sont constantes sur chacun des intervalles $[T_i; T_{i+1}[$. Les autres variables évoluent de la manière suivante :

$$\frac{dv}{dt}(t) = a(t), \quad (\text{F.1})$$

$$\frac{d\alpha}{dt}(t) = \omega(t), \quad (\text{F.2})$$

$$\frac{dx}{dt}(t) = v(t) \cos \alpha(t), \quad (\text{F.3})$$

$$\frac{dy}{dt}(t) = v(t) \sin \alpha(t), \quad (\text{F.4})$$

$$\frac{d\tau}{dt}(t) = -1. \quad (\text{F.5})$$

Les variables $a(t)$ et $\omega(t)$ étant constantes par morceaux, une expression analytique explicite de la position est obtenue par une intégration des équations du mouvement. Sur l'intervalle

$[T_i; T_{i+1}[$ on a :

$$a(t) = a_i, \quad (\text{F.6})$$

$$\omega(t) = \omega_i, \quad (\text{F.7})$$

ce qui donne :

$$v(t) = v_i + (t - t_i) a_i, \quad (\text{F.8})$$

$$\alpha(t) = \alpha_i + (t - t_i) \omega_i, \quad (\text{F.9})$$

et enfin, deux cas se posent alors :

1. si $\omega = 0$,

$$x(t) = x_i + \tau \frac{v_x(t) + v_x(T_i)}{2}, \quad (\text{F.10})$$

$$y(t) = y_i + \tau \frac{v_y(t) + v_y(T_i)}{2}, \quad (\text{F.11})$$

2. sinon,

$$x(t) = x_i + \frac{1}{\omega_i} [v(u) \sin \alpha(u)]_{T_i}^t + \frac{a_i}{\omega_i^2} [\cos \alpha(u)]_{T_i}^t, \quad (\text{F.12})$$

$$y(t) = y_i - \frac{1}{\omega_i} [v(u) \cos \alpha(u)]_{T_i}^t + \frac{a_i}{\omega_i^2} [\sin \alpha(u)]_{T_i}^t. \quad (\text{F.13})$$

Dynamique discrète

Les changements de mode discret se produisent lorsque $\tau(t)$ atteint 0. Les ré initialisations suivantes se produisent alors :

- l'ancien état cible devient l'état courant ie. $S(t) = S^+(t^-)$
- le nouvel état cible $S^+(t)$ est donné par une chaîne de Markov dont l'état présent est $S(t)$ et la matrice de transition \mathbf{P}
- $\tau(t) = \tau(T(t), T^+(t))$
- on réinitialise $a(t)$ et $\omega(t)$ en utilisant un couple $(v^+, \delta\alpha^+)$ tiré selon la loi $p(\cdot | \theta^+(t))$, par les formules suivantes :

$$a(t) = \frac{v^+ - v(t)}{\tau(t)} \quad (\text{F.14})$$

$$\omega(t) = \frac{\delta\alpha^+}{\tau(t)} \quad (\text{F.15})$$

- enfin, les variables $v(t)$, $\alpha(t)$, $x(t)$ et $y(t)$ restent continues lors des transitions discrètes.

Annexe G

Jeux de paramètres pour le modèle piéton

G.1 Propriétés à priori des jeux de paramètres

La figure G.1 permet d'avoir un aperçu des propriétés relatives des jeux de paramètres entre eux.

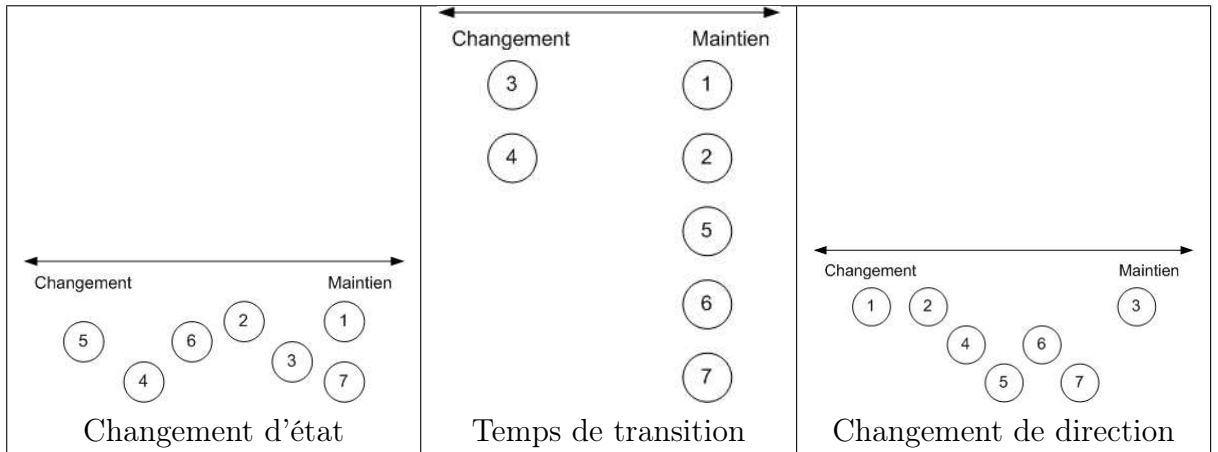


FIG. G.1 – Comparaison entre les jeux de paramètres du modèle de piétons.

La description détaillée des sept jeux de paramètres est donnée dans ce qui suit.

G.2 Jeu de paramètres n° 1

Probabilités de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,95	0,04	0,01	0
Marche	0,09	0,9	0,01	0
Course lente	0	0,09	0,85	0,06
Course rapide	0	0	0,15	0,85

Durées de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,5	1	1,5	0
Marche	1	0,5	1	0
Course lente	0	1	1	1
Course rapide	0	0	1	1,5

Probabilités de changement de direction principale

Valeur absolue des changements de direction (rad)	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
Immobile	0,7	0,14	0,09	0,06	0,01
Marche	0,85	0,09	0,06	0	0
Court lentement	0,85	0,15	0	0	0
Court vite	0,9	0,1	0	0	0

Probabilité d'aller à gauche : 0,5.

G.3 Jeu de paramètres n° 2

Probabilités de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,9	0,08	0,02	0
Marche	0,09	0,9	0,01	0
Course lente	0	0,09	0,85	0,06
Course rapide	0	0	0,25	0,75

Durées de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,5	1	1,5	0
Marche	1	0,5	1	0
Course lente	0	1	1	1
Course rapide	0	0	1	1,5

Probabilités de changement de direction principale

Valeur absolue des changements de direction (rad)	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
Immobile	0,75	0,12	0,09	0,03	0,01
Marche	0,85	0,09	0,06	0	0
Court lentement	0,88	0,12	0	0	0
Court vite	0,9	0,1	0	0	0

Probabilité d'aller à gauche : 0,5.

G.4 Jeu de paramètres n° 3

Probabilités de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,8	0,15	0,05	0
Marche	0,07	0,85	0,08	0
Course lente	0	0,13	0,8	0,07
Course rapide	0	0	0,1	0,9

Durées de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,5	1	1,5	0
Marche	0,5	0,5	1	0
Course lente	0	1	1	1
Course rapide	0	0	1	1,5

Probabilités de changement de direction principale

Valeur absolue des changements de direction (rad)	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
Immobile	0,78	0,1	0,08	0,03	0,01
Marche	0,9	0,07	0,03	0	0
Court lentement	0,9	0,1	0	0	0
Court vite	0,93	0,07	0	0	0

Probabilité d'aller à gauche : 0,5.

G.5 Jeu de paramètres n° 4

Probabilités de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,8	0,15	0,05	0
Marche	0,1	0,8	0,1	0
Course lente	0	0,1	0,8	0,1
Course rapide	0	0	0,2	0,8

Durées de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,5	1	1,5	0
Marche	0,5	0,5	1	0
Course lente	0	1	1	1
Course rapide	0	0	1	1,5

Probabilités de changement de direction principale

Valeur absolue des changements de direction (rad)	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
Immobile	0,78	0,1	0,08	0,03	0,01
Marche	0,88	0,08	0,04	0	0
Court lentement	0,9	0,1	0	0	0
Court vite	0,93	0,07	0	0	0

Probabilité d'aller à gauche : 0,5.

G.6 Jeu de paramètres n° 5

Probabilités de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,75	0,2	0,05	0
Marche	0,2	0,75	0,05	0
Course lente	0	0,15	0,75	0,1
Course rapide	0	0	0,25	0,75

Durées de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,5	1	1,5	0
Marche	1	0,5	1	0
Course lente	0	1	1	1
Course rapide	0	0	1	1,5

Probabilités de changement de direction principale

Valeur absolue des changements de direction (rad)	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
Immobile	0,78	0,1	0,08	0,03	0,01
Marche	0,88	0,09	0,03	0	0
Court lentement	0,9	0,1	0	0	0
Court vite	0,93	0,07	0	0	0

Probabilité d'aller à gauche : 0,5.

G.7 Jeu de paramètres n° 6

Probabilités de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,85	0,1	0,05	0
Marche	0,08	0,85	0,07	0
Course lente	0	0,1	0,85	0,05
Course rapide	0	0	0,15	0,85

Durées de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,5	1	1,5	0
Marche	1	0,5	1	0
Course lente	0	1	1	1
Course rapide	0	0	1	1,5

Probabilités de changement de direction principale

Valeur absolue des changements de direction (rad)	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
Immobile	0,78	0,1	0,08	0,03	0,01
Marche	0,89	0,08	0,03	0	0
Court lentement	0,9	0,1	0	0	0
Court vite	0,93	0,07	0	0	0

Probabilité d'aller à gauche : 0,5.

G.8 Jeu de paramètres n° 7

Probabilités de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,9	0,08	0,02	0
Marche	0,06	0,9	0,04	0
Course lente	0	0,05	0,9	0,05
Course rapide	0	0	0,1	0,9

Durées de changement d'état

$S_n \setminus S_{n+1}$	Immobile	Marche	Course lente	Course rapide
Immobile	0,5	1	1,5	0
Marche	1	0,5	1	0
Course lente	0	1	1	1
Course rapide	0	0	1	1,5

Probabilités de changement de direction principale

Valeur absolue des changements de direction (rad)	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
Immobile	0,78	0,10	0,08	0,03	0,01
Marche	0,89	0,09	0,02	0	0
Court lentement	0,9	0,1	0	0	0
Court vite	0,93	0,07	0	0	0

Probabilité d'aller à gauche : 0,5.

G.9 Principaux résultats sur les trajectoires

Pour chaque jeu, 500 trajectoires de cinq secondes ont été générées à partir de quatre situations initiales correspondant aux quatre états discrets. Il a été vérifié que les sept jeux de paramètres permettent de générer des trajectoires dont moins de 5 % sont rejetées pour manque de réalisme.

De plus, ces jeux de paramètres permettent de générer les classes de trajectoires ci-dessous :

1. dans l'état immobile :
 - pas de changement de direction,
 - quart de tour,
 - demi-tour,
 - gauche-droite ou droite-gauche,
 - passage à un état mobile,
2. dans un état mobile
 - changement vers un autre état mobile,
 - changement vers l'état immobile,
 - avancer droit devant,
 - partir d'un côté,
 - faire demi-tour et repartir dans la direction opposée,
 - contournement d'un obstacle,
 - changement de file.

Les sept jeux de paramètres sont des candidats acceptables. La moyenne et l'écart type des abscisses des positions des piétons au bout de une, deux, trois, quatre et cinq secondes sont donnés dans les figures ci-dessous. Pour chaque instant, l'écart type et la moyenne sont données, de gauche à droite, pour les 7 jeux de paramètres. La 8^e barre correspond à la moyenne sur ces 7 jeux. Le premier jeu de paramètres est pris comme référence pour le calcul de l'écart type et de la moyenne relatives.

La figure G.2 montre que les jeux 3 à 6 génèrent beaucoup de piétons qui deviennent mobiles. Le seuil acceptable de probabilité de maintien dans l'état immobile est supérieur à 0,85.

La figure G.3 montre que les probabilités de maintien dans l'état marche sont trop faibles pour les jeux 3 à 6. Cette probabilité vaut 0,85 pour 3 et pour 6. Le jeu n°6 compense cette faible probabilité par un temps de passage de l'état marche à l'état immobile d'une seconde, deux fois à celui de 3. Le seuil acceptable semble là aussi compris entre 0,85 et 0,9.

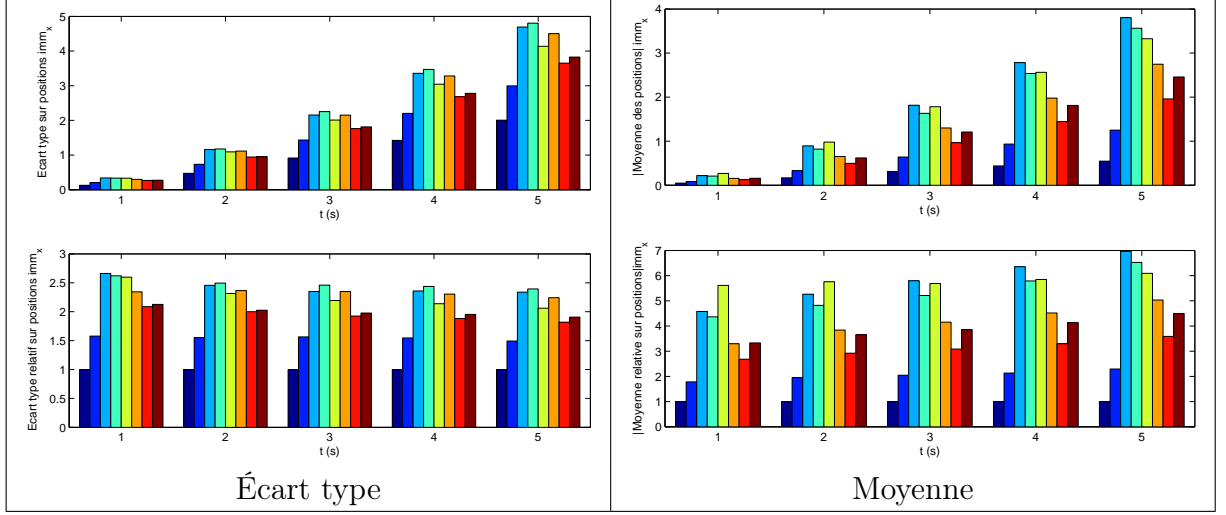


FIG. G.2 – Piéton initialement immobile, répartition de l'abscisse de sa position après quelques secondes.

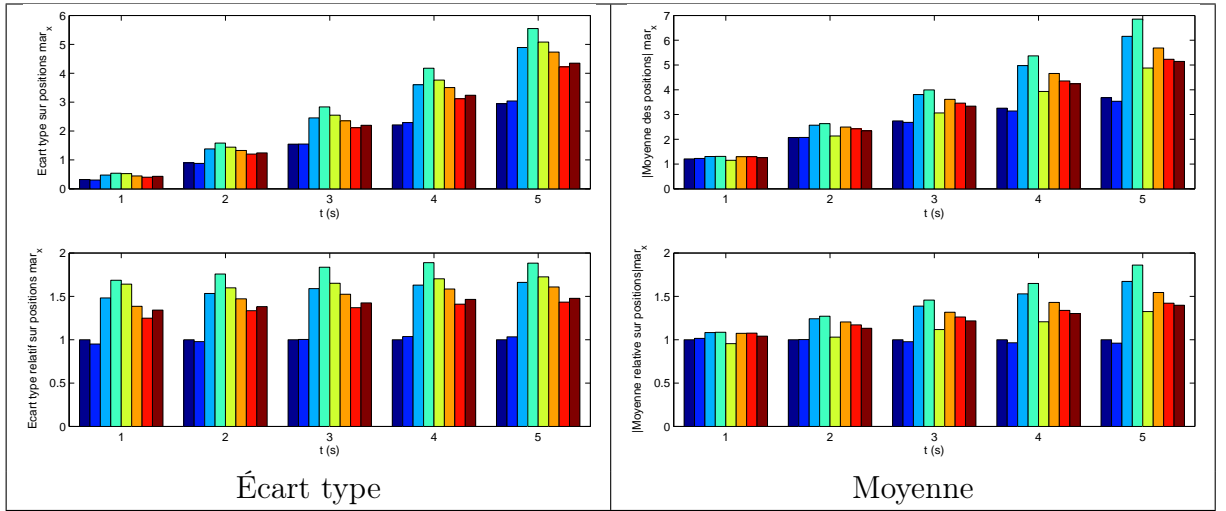


FIG. G.3 – Piéton qui marche initialement, répartition de l'abscisse de sa position après quelques secondes.

La figure G.4 montre que le choix de la probabilité de maintien dans l'état « course lente » entre 0,75 et 0,9 a peu d'impact sur les trajectoires (à cause des vitesses élevées). C'est également le cas dans l'état course.

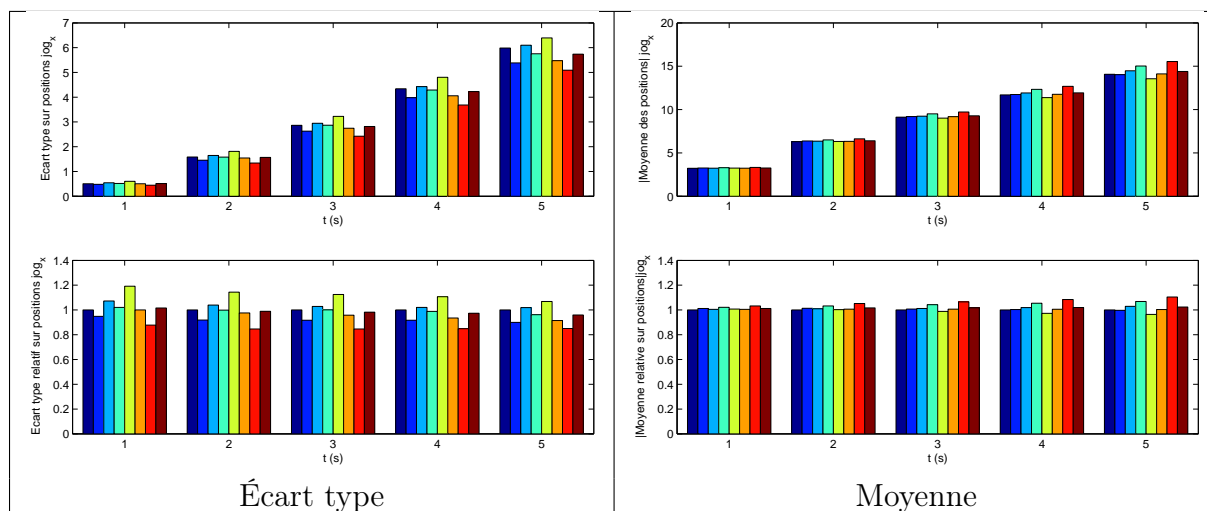


FIG. G.4 – Piéton qui trotte initialement, répartition de l'abscisse de sa position après quelques secondes.

Malgré ces analyses, il reste difficile de trancher ouvertement pour un jeu de paramètres aux dépens des autres. En effet, les paramètres n'influent pas de manière indépendante sur les trajectoires et des combinaisons différentes peuvent aboutir à des résultats similaires.

Annexe H

Estimation d'une loi de probabilité à partir de sa densité empirique

H.1 Limites de l'histogramme

L'histogramme permet de se faire une idée de la loi de probabilité d'une variable aléatoire X , à partir de sa distribution empirique.

Un histogramme est constitué de rectangles juxtaposés dont la base correspond à l'amplitude de chaque classe et dont la surface est proportionnelle à la fréquence absolue ou relative de cette classe [141]. Le polygone de fréquences est un moyen de représenter graphiquement la distribution.

Cette représentation non paramétrique de la loi de probabilité est sensible au nombre de classes :

- s'il n'y a pas suffisamment de classes, la forme de l'histogramme est grossière et il y a perte d'information,
- si le nombre de classes est trop élevé, des artefacts apparaissent.

Sturges a suggéré que, pour un nombre total d'échantillons de n , le nombre optimal de classes k est :

$$k = 1 + \log_2(n) \quad [142] \quad (\text{H.1})$$

Cette règle s'applique bien tant que n ne dépasse pas quelques centaines et si la distribution est à peu près normale. Lorsque n prend de grandes valeurs (plus d'un millier) et que la distribution est loin d'être normale, cette règle n'est plus valable [143]. Des règles sur la largeur h des classes peuvent être utilisées [143] :

- la règle de Scott :

$$h = 3,5\sigma n^{-1/3}, \quad (\text{H.2})$$

- la règle de Freedman et Diaconis :

$$h = 2(q_3 - q_1)n^{-1/3}. \quad (\text{H.3})$$

où σ est l'écart type de la distribution et q_i le i^{e} quantile.

Même si certains problèmes sont levés, l'histogramme est une fonction constante par morceaux. Au sein d'une même classe, la densité $d(x)$ est la même, quelque soit la position de x dans l'intervalle correspondant à la classe.

H.2 Utilisation de noyaux

L'utilisation d'une fenêtre mobile limite le problème évoqué ci-dessus. Soit l'intervalle $I_x = [x - h/2; x + h/2[$ de largeur h (appelée constante de lissage). La densité en x est estimée en dénombrant les occurrences appartenant à I_x :

$$\hat{f}(x) = \frac{\text{Card}\{x_i/x_i \in I_x\}}{n} \quad (\text{H.4})$$

Si l'on introduit $1_{\mathcal{E}}$, la fonction caractéristique de l'ensemble \mathcal{E} :

$$1_{\mathcal{E}}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in \mathcal{E} \\ 0 & \text{si } x \notin \mathcal{E} \end{cases} \quad (\text{H.5})$$

l'équation H.4 s'écrit :

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1_{\mathcal{E}}\left(\frac{x - x_i}{h}\right). \quad (\text{H.6})$$

L'utilisation de fenêtres rectangulaires en traitement du signal est réputée pour donner des résultats peu réguliers. L'équation H.6 se généralise en utilisant une fonction noyau (kernel en anglais) notée K . Cela donne :

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right). \quad (\text{H.7})$$

L'utilisation de noyaux continus permet d'obtenir une fonction plus lisse. Ils sont souvent symétriques. Les deux noyaux les plus utilisés sont

1. le noyau gaussien :

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2.\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad (\text{H.8})$$

2. le noyau parabolique d'Epanechnikov :

$$K(u) = \frac{3}{4\sqrt{5}} \left(1 - \frac{u^2}{5}\right) \text{ pour } |u| < \sqrt{5}. \quad (\text{H.9})$$

La fonction `ksdensity` permet de réaliser cette estimation sous Matlab [144].

Annexe I

Prédiction de positions de piétons

I.1 Prédiction à une seconde

Les résultats d'une prédiction de position dans une seconde sont présentés. 2,5 millions de positions de piétons dans le plan, ainsi que l'enveloppe convexe et quelques descripteurs statistiques de cet ensemble sont donnés figure I.1.

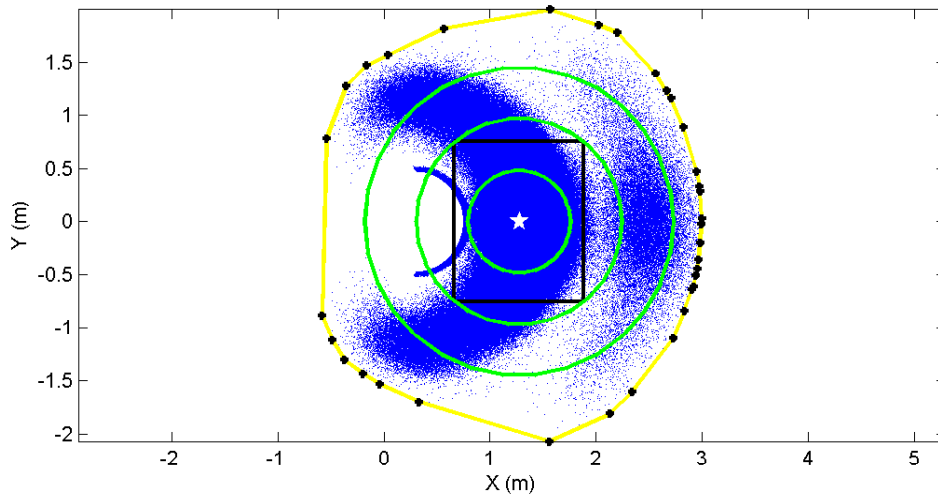


FIG. I.1 – 2,5 millions de positions de piétons après une seconde. L'enveloppe convexe est donnée en jaune. Les trois cercles sont centrés sur la position moyenne (repérée par l'étoile blanche) et ont pour diamètres respectifs une, deux, et trois fois l'écart type sur les positions. Le rectangle, quant à lui, est centré sur la moyenne du nuage et a pour largeur et longueur 4 fois les écarts types respectifs des abscisses et des ordonnées.

La répartition des positions n'est clairement pas gaussienne. Par contre, les rayons polaires de ces positions (figure I.2), semblent répartis selon une loi composée d'un mélange de gaussiennes. Cependant, la possibilité de ne pas avancer en ligne droite biaise en partie cette distribution : la partie située à gauche (du côté de la position initiale) du mode de chaque gaussienne est plus importante que la partie droite.

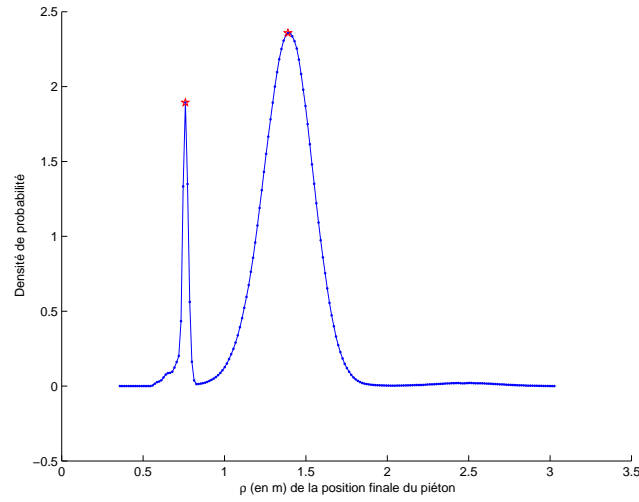


FIG. I.2 – Densité de probabilité du rayon polaire de la position du piéton après une seconde. Calcul réalisé avec 2,5 millions de cas. Deux modes se distinguent : le cas où le piéton marche pendant une seconde (81% des cas), et celui (plus fin, puisque moins probable, 8,5% des cas) où il s'arrête.

I.2 Prédiction à trois secondes

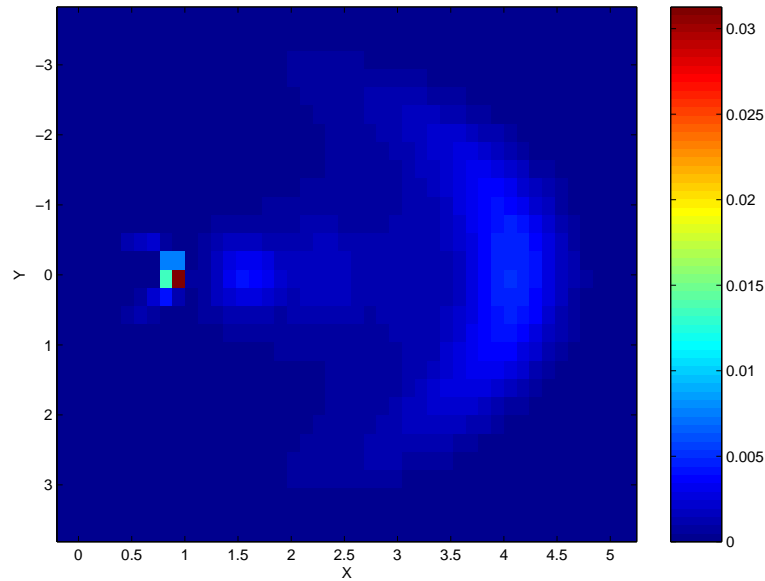


FIG. I.3 – Répartition des positions d'un piéton après trois secondes.

Initialement, le piéton marche à 1,5 m/s dans la direction $\alpha = 0$. La figure I.3 donne la répartition dans le plan cartésien des positions finales. La densité de probabilité des positions du piéton dans le repère cartésien est calculée à partir de dix millions de trajectoires de piétons de trois secondes.

- On remarque que la densité de probabilité de la position du piéton dessine des fronts

qui correspondent aux chemins les plus probables. On distingue notamment les cas :

- où le piéton est resté dans l'état marche,
- où il s'est arrêté après avoir marché pendant quelques cycles.
- On remarque aussi que la répartition est symétrique par rapport à l'axe des abscisses, puisque le piéton a la même probabilité d'aller à gauche qu'à droite.
- De plus, la position étant obtenue par intégration de la vitesse, plus le piéton évolue à une allure importante, plus la répartition de positions est dispersée.
- Enfin, la dispersion augmente avec la durée du déplacement du piéton.

Le vecteur vitesse du piéton est régi par des lois sur ses composantes dans un repère polaire. Les répartitions de la norme et de l'angle de ses positions sont données figure I.4 et figure I.5.

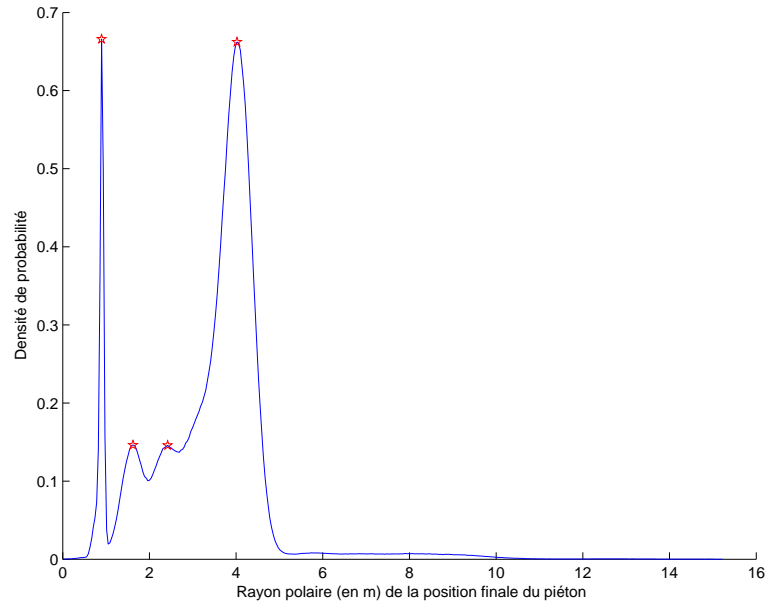


FIG. I.4 – Répartition de la position (rayon polaire) d'un piéton après trois secondes. Les quatre principaux modes détectés sont repérés par une petite étoile.

L'utilisation de noyaux gaussiens ou de noyaux d'Epanechnikov permet de tracer une estimation non paramétrique et lisse (voir l'annexe H) de la densité de probabilité du rayon polaire de la position du piéton.

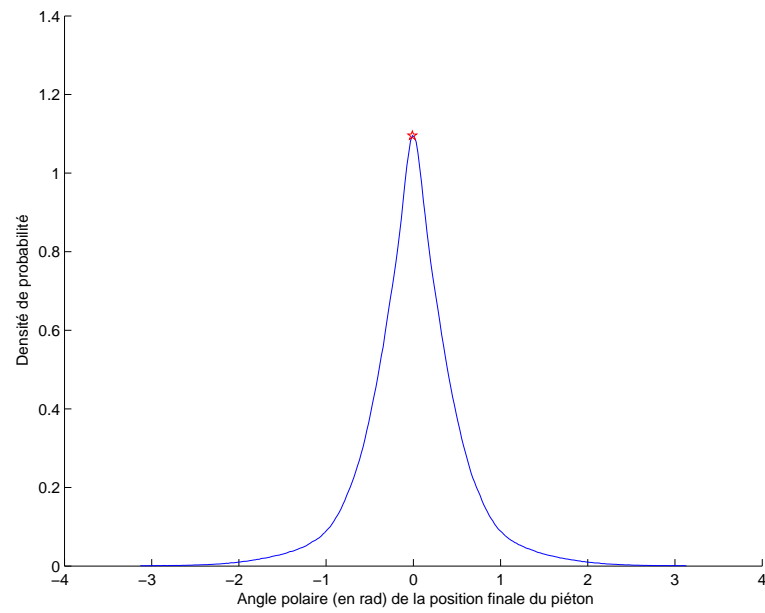


FIG. I.5 – Densité de probabilité de la position angulaire d'un piéton après trois secondes.

Annexe J

Outliers ou mesures aberrantes

Cette annexe est adaptée de [145–147]. En statistiques, un « outlier » ou « mesure aberrante » est une observation isolée et « éloignée » du reste des données. Cela se traduit de la façon suivante :

$$x < Q_1 - 1,5IQR \text{ ou } x > Q_3 + 1,5IQR, \quad (\text{J.1})$$

avec Q_i le i^{e} quartile et $IQR = Q_3 - Q_1$, l'écart inter-quartiles.

Ces valeurs définissent les « limites intérieures » de la distribution de données, au delà desquelles une observation est qualifiée d'« outlier modéré ». Les « outliers extrêmes » sont les observations situées au delà des limites extérieures :

$$x < Q_1 - 3IQR \text{ ou } x > Q_3 + 3IQR. \quad (\text{J.2})$$

Ces événements se produisent avec une faible probabilité et requièrent une attention spécifique, puisqu'ils sont souvent le résultat d'un problème d'échantillonnage ou d'acquisition voire de traitement des données. D'un autre côté, un outlier est la manifestation d'un phénomène réel très rare, qui mérite une attention particulière.

Avec ces définitions, pour une distribution gaussienne des données, seule une observation sur 150 sera un « outlier modéré » et environ une observation sur 425 000 sera un « outlier extrême ».

Même lorsque les données peuvent être modélisée de façon appropriée par une loi normale, des outliers peuvent se glisser dans les données si le nombre d'échantillons est important, et ils doivent être pris en compte. Dans d'autres cas, la distribution étudiée ne peut tout simplement pas être approchée par une loi normale, à cause de l'importante queue de probabilité.

C'est notamment le cas d'un échantillonnage à partir d'une distribution suivant une loi de Cauchy-Lorentz², dont la forme générale est [149] :

$$P(X = x, \gamma, x_0) = \frac{1}{\pi\gamma[1 + (\frac{x-x_0}{\gamma})^2]}. \quad (\text{J.3})$$

La variance des données prélevées augmente avec la taille de l'échantillon, la moyenne de l'échantillon ne converge pas et elle produit beaucoup plus d'outliers qu'une distribution normale, comme l'illustre la figure J.1.

²distribution de Lévy alpha stable et symétrique [148]

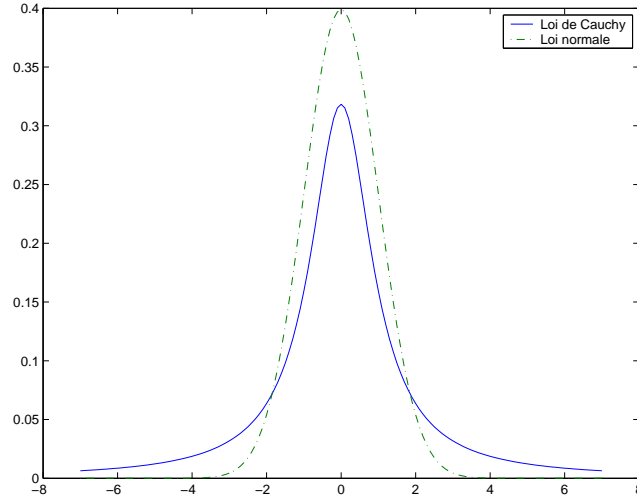


FIG. J.1 – Loi de Cauchy standard et loi normale centrée réduite

Une distribution suivant la loi de Cauchy est simulée grâce à la méthode d'inversion. Soit la fonction de répartition d'une v.a. (variable aléatoire) X ,

$$F(X) = P(x \leq X). \quad (\text{J.4})$$

Si U est une v.a. uniforme sur $[0, 1]$, alors $X = F^{-1}(U)$ est une v.a. de fonction de répartition F . Dans le cas de la loi de Cauchy :

$$F(X) = \frac{1}{\pi\gamma(1 + \frac{x-x_0}{\gamma})^2} \quad \text{et} \quad F^{-1}(u) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{u - x_0}{\gamma}\right). \quad (\text{J.5})$$

Sous Matlab [®], grâce à la fonction **rand**, la méthode d'inversion permet d'obtenir une v.a. suivant la loi de Cauchy.

La fonction $\text{Cauchy}(x_0, \gamma)(t)$ est définie comme étant un bruit blanc dont la ddp suit la loi de Cauchy avec les paramètres γ et x_0 .

Références bibliographiques

- [1] M. Peden, R. Scurfield, D. Sleet, D. Mohan, A. A. Hyder, E. Jarawan, and C. Mathers, "Rapport mondial sur la prévention des traumatismes dus aux accidents de la circulation," Organisation Mondiale de la Santé et Banque Mondiale," Publication hors série, Avril 2004.
- [2] European New Car Assessment Programme. [Online]. Available : <http://www.euroncap.com/>
- [3] "Directive 2003/102/EC of the European Parliament and of the Council of 17 November 2003 relating to the protection of pedestrians and other vulnerable road users before and in the event of a collision with a motor vehicle and amending council directive 70/156/eec," pp. 0015 – 0025, Dec. 6, 2003.
- [4] Honda Worldwide, "Honda develops world's first intelligent night vision system able to detect pedestrians and provide driver cautions," aug 2004. [Online]. Available : http://world.honda.com/news/2004/4040824_01.html
- [5] C. Wakim, "Procédé et système embarqué de prédiction de choc entre un véhicule et un piéton," Brevet déposé à l'INPI (n° 05-06504), 27 juin 2005.
- [6] —, "Procédé et système anti-collision adaptatif pour véhicule automobile," Brevet déposé à l'INPI (n°05-06505), 27 juin 2005.
- [7] Mizuno, Friedel, and Cesari, "Preliminary report," UN/ECE/WP29/GSRP Pedestrian Safety GTR informal Group, Tech. Rep. 5, 24-27 June 2003. [Online]. Available : <http://www.unece.org/trans/doc/2003/wp29/TRANS-WP29-130-inf05e.pdf>
- [8] Care Community Road Accident Database. (2004) Accident statistics. European Commission : Transport. [Online]. Available : <http://europa.eu.int/comm/transport/care/>
- [9] OCDE, "Base de données internationale sur la circulation et les accidents de la route - international road traffic and accident database," 2004. [Online]. Available : <http://www.bast.de/htdocs/fachthemen/irtad/>
- [10] M. Danner and K. Langwieder, "Collision characteristics and injuries to pedestrians in real accidents," in *Proceedings of the seventh ESV conference*, no. 7, Paris, France, 1979.
- [11] H. Lauras, "Les piétons victimes d'accident du trafic routier. étude informatique de 373 expertises médico-légales," Thèse pour le doctorat en médecine, Université de Clermont Ferrand, France, 1980, fond national des thèses.
- [12] A. Manoli, "Adult pedestrian injuries - medical aspects," in *SAE*, 1986.
- [13] K. Jarrett and R. Saul, "Pedestrian injury - analysis of the PCDS field collision data," in *ESV*, 1998.
- [14] L. van Kampen and J. Huijbers, "Cost of pedestrian and bicycle accidents involving front car ends," in *Proceedings of the fourteenth ESV conference*, no. 14, Munich, Germany, 1994.

- [15] A. Chidester and R. Isenberg, "Final report - the pedestrian crash data study," in *ESV*, 2001.
- [16] Sécurité routière, "Les grandes données de l'accidentologie," mai 2004.
- [17] Groupe de travail intersecrétariats sur les statistiques de transports (IWG), "Glossaire des statistiques de transport. Transmis par Eurostat." Organisation des Nations Unies - Commission Économique pour l'Europe - Comité des transports intérieurs, Tech. Rep. TRANS/WP.6/2001/8, 14-16 novembre 2001. [Online]. Available : <http://www.unecce.org/trans/main/wp6/pdfdocs/2001-8f.pdf>
- [18] J. Stutts, W. Hunter, and W. Pein, "Pedestrian Crash Types : 1990s update," *Transportation Research Record*, no. 1538, 1996.
- [19] F. Ferrandez, *L'étude détaillée d'accidents orientée vers la sécurité primaire*. Presses ENPC, 1995, pp. 88–89.
- [20] D. Fleury, *Sécurité et urbanisme - La prise en compte de la sécurité routière dans l'aménagement urbain*. Presses ENPC, 1998.
- [21] H. de Silva, *Why we have automobile accidents*. Wiley, 1951, ch. Pedestrians, pp. 220–239.
- [22] P. Van Eslande, L. Alberton, C. Nachtergaële, and G. Blanchet, "Scénarios-types de production de l'erreur humaine dans l'accident de la route. Problématique et analyse qualitative," INRETS," Rapport 218, 1997.
- [23] T. Brénac and B. Megherbi, "Diagnostic de sécurité routière sur une ville : intérêt de l'analyse fine de procédures d'accidents tirées aléatoirement," *RTS*, no. 52, pp. 59–71, 1996.
- [24] T. Brénac, *L'analyse séquentielle de l'accident de la route (méthode INRETS)*, ser. Outils et méthodes. INRETS, 1997, no. 3.
- [25] DTLR, "OTS accident research on the spot," 2000.
- [26] T. Fugger Jr., B. C. Randles, and J. J. Eubanks, "The efficacy of event data recorders in pedestrian-related accidents," in *SAE World Congress*. SAE, Mar. 2004, paper 2004-01-1195.
- [27] H. Fontaine, Y. Gourlet, and A. Ziani, "Les accidents de piétons. analyse typologique," INRETS," Rapport INRETS 201, 1995.
- [28] D. Wood and S. O'Riordain, "Monte Carlo simulation methods applied to accident reconstruction and avoidance analysis," in *SAE ICE*, 1994, paper 940720.
- [29] G. Schokenhoff, H. Appel, and H. Rau, "Representation of actual reconstruction methods for car to car accidents; as confirmed by crash tests," in *SAE*, 1985, paper 850066.
- [30] A. Happer, M. Araszewski, A. Toor, R. Overgaard, and R. Johal, "Comprehensive analysis method for vehicle/pedestrian collisions," in *SAE ICE Detroit Michigan*, 2000, paper 2000-01-0846.
- [31] A. Moser, H. Steffan, and G. Ksanicky, "The pedestrian model in PC-crash - The introduction of a multi body system and its validation," in *SAE ICE Detroit Michigan*, 1999, paper 1999-01-0445.
- [32] B. Randles, T. Fugger Jr., J. Eubanks, and E. Pasanen, "Investigation and analysis of real life pedestrian collisions," in *SAE ICE Detroit Michigan*, 2001, paper 2001-01-0171.
- [33] J. Eubanks and W. Haight, "Pedestrian involved traffic collision reconstruction methodology," in *SAE*, 1992, paper 921591.

-
- [34] D. Wood, "Application of a pedestrian impact model to the determination of impact speed," in *SAE*, 1991, paper 910814.
 - [35] L. Grösch, H. P. Kaiser, and W. Schmid, "Mathematical movement and load simulation for persons involved in an automobile accident," in *SAE*, 1987, paper 871109.
 - [36] N. Metropolis and S. Ulam, "The Monte Carlo method," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 44 (247), pp. 335–341, 1949.
 - [37] L. Evans, *Traffic safety and the driver*. Van Nostrand Reinhold, 1991.
 - [38] G. Forbes and B. Malone, "Are we speaking the same language? defining systemic safety problems," in *Proceedings of the Canadian multidisciplinary road safety conference XII*, June 10–13, 2001.
 - [39] F. Tardif, "Analyse du risque des véhicules de promenade selon la marque et le modèle," in *Proceedings of the Canadian multidisciplinary road safety conference XII*, June 10–13, 2001.
 - [40] M. Keal, "Pedestrian exposure to risk of road accident in New Zealand," *Accid. Anal. and Prev.*, vol. 27, no. 5, pp. 729–740, 1995.
 - [41] Metroplan Orlando, "A study of 617 motorist-versus-pedestrian crashes on state roads 50 & 436 and US Highways 17/92, 192 and 441 during the years 1993 through 1997," Orlando Urban Area Arterial Pedestrian Crash Study, Tech. Rep., 2000.
 - [42] N. Takubo and K. Mizuno, "Accident analysis of sports utility vehicles : human factors from statistical analysis and case studies," *JSAE review*, vol. 21, pp. 103–108, 2000.
 - [43] W. Mercer and M. Hennig, "An empirical approach to crash classification, quantification and counter-measure selection," in *Proceedings of the Canadian multidisciplinary road safety conference XII*, June 10–13, 2001.
 - [44] D. Boucher, "Classifying vehicle collisions based on police accident reports for crash avoidance purposes," in *Proceedings of the Canadian multidisciplinary road safety conference XII*, June 10–13, 2001.
 - [45] R. Harruff, A. Avery, and A. Alter-Pandya, "Analysis of circumstances and injuries in 217 pedestrian traffic fatalities," *Accid. Anal. and Prev.*, vol. 30, no. 1, pp. 11–20, 1998.
 - [46] R. Retting, A. Williams, D. Preusser, and H. Weinstein, "Classifying urban crashes for countermeasure development," *Accid. Anal. and Prev.*, vol. 27, no. 3, pp. 283–294, 1995.
 - [47] J. Schofer, K. Kaufer Christoffel, M. Donovan, J. Lavigne, R. Tanz, and K. Wills, "Child pedestrian injury taxonomy based on visibility and action," *Accid. Anal. and Prev.*, vol. 27, no. 3, pp. 217–233, 1995.
 - [48] B. Megherbi, "L'insécurité d'une ville moyenne approchée par l'analyse fine des accidents et leur agrégation en scénarios-types," Master's thesis, Université Paris XII, 1994.
 - [49] T. Brénac, J. Delcamp, S. Pelat, and G. Teisseire, "Scénarios types d'accidents de la circulation dans le département des bouches-du-rhône," INRETS, Tech. Rep. MA 9611-2, 1996.
 - [50] T. Brénac and D. Fleury, "Le concept de scénario type d'accident de la circulation et ses applications," *RTS*, no. 63, 1999.
 - [51] Bureau of Economic and Business Research, "Transportation issues : Pedestrian safety," University of Florida, FDOT contract BC-354-44, Part B, Oct. 2003.

- [52] University of North Carolina Highway Safety Research Center, "Pedestrian and bicycle crash analysis tool," US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Tech. Rep., 1999.
- [53] Pedestrian crashes : crash types. [Online]. Available : <http://www.walkinginfo.org>
- [54] University of North Carolina Highway Safety Research Center, "Pedestrian crash types summary report," North Carolina Department of Transportation, Tech. Rep., 2002. [Online]. Available : http://www.pedbikeinfo.org/pbcat/pdf/summary_ped_types5yrs.pdf
- [55] M. Tira and T. Brénac, "Scénarios d'accidents de la circulation et cartographie," in *La rappresentazione cartografica degli incidenti stradali*, Brescia, Italy, Dec. 1997.
- [56] T. Brénac and J. Yerpez, "Scénarios-types d'accidents de piétons," in *Journées d'études sur les accidents piétons*, Paris, la Défense, France, Sept. 1997.
- [57] C. Wakim, S. Capperon, and J. Oksman, "Design of pedestrian detection systems for the prediction of car-to-pedestrian accidents," in *7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, October 3-6 2004, pp. 696–701.
- [58] C. Wakim, "Pedestrian detection for the prediction of car-to-pedestrian accidents," *Revue Ingénieurs de l'Automobile*, no. 773, pp. 78–82, novembre-décembre 2004.
- [59] Sécurité routière, "La sécurité des piétons en 1995," 1995.
- [60] T. Brénac, C. Nachtergaële, and H. Regnier, "Scénarios types d'accidents impliquant des piétons." INRETS, Tech. Rep., 2003.
- [61] M. DaSilva, J. Smith, and W. Najm, "Analysis of pedestrian crashes," NHTSA. DOT HS 809 585, Tech. Rep., 2003.
- [62] G. Reymond, A. Heidet, M. Canry, and A. Kemeny, "Validation of Renault's dynamic simulator for Adaptative Cruise Control experiments," in *Driving Simulation Conference*, 2000.
- [63] Le Monde Informatique. (2004, 18 novembre) Renault inaugure Ultimate, son nouveau simulateur de conduite.
- [64] AFP. (2004, 22 octobre) Renault inaugure un simulateur de conduite à hautes performances. [Online]. Available : <http://www.autoactu.com/data/22102004/22102004-145543.html>
- [65] T. Cazenave, "Automatically improving agents behaviors in an urban simulation," in *Proceedings of the Second International Conference of the Journal of Industrial Engineering and Applications*, San Diego, Nov. 1997.
- [66] H. Klüpfel, T. Meyer-König, J. Wahle, and M. Schreckenberg, *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata*. London : S. Bandini and T. Worsch, 2000, ch. Microscopic Simulation of Evacuation Processes on Passenger Ships, pp. 63–71.
- [67] D. Harney, "Pedestrian modelling : Current methods and future directions," *Road & Transport Research*, vol. 11, no. 4, pp. 38–48, 2002.
- [68] K. Teknomo, "Microscopic pedestrian flow characteristics : Development of an image processing data collection and simulation model," Ph.D. dissertation, Departement of Human Social Information Sciences, Graduate School of Information Sciences, Tokohu University, Japan, Mar. 2002.

- [69] T. Fugger, Jr., B. Randles, J. Wobrock, A. Stein, and W. Whiting, "Pedestrian behavior at signal controlled crosswalks," in *SAE ICE*, 2001.
- [70] D. Silcock, R. Walker, and T. Selby, "Pedestrians at risk," in *PTRC proceedings of European transport conference*, 1998, pp. 209–219.
- [71] W. Daamen and S. P. Hoogendoorn, "Experimental Research of Pedestrian Walking Behaviour," *Transportation Research Record*, vol. 1828, no. 03-3113, 2003.
- [72] J. Zhao and J. Wu, "Analysis of pedestrian behavior with mixed traffic flow at intersection," in *Proceedings of the Intelligent Transportation Systems Conference*. IEEE, 2003, pp. 323–327.
- [73] D. Evans and P. Norman, "Understanding pedestrians' road crossing decisions : an application of the theory of planned behaviour," *Health Education Research Theory and Practice*, vol. 13, no. 4, pp. 481–489, 1998.
- [74] A. Hanisch, J. Tolujew, K. Richter, and T. Schulze, "Online simulation of pedestrian flow in public buildings," in *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, S. Chick, P. J. Sanchez, D. Ferrin, and D. Morrice, Eds., Jan. 2003, pp. 1635–1641.
- [75] J. Kerridge, J. Hine, and M. Wigan, "Agent-based modelling of pedestrian movements : the questions that need to be asked and answered," *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol. 28, pp. 327–341, 2001.
- [76] P. M. Torrens, "Automata-based urban simulation," in *2002*, Nov.
- [77] Observatoire national interministériel de sécurité routière, "Bulletin d'analyse des accidents corporels de la circulation routière," 1991.
- [78] S. P. Hoogendoorn, "Pedestrian modelling by optimal control and differential games," in *German - Dutch - Finnish Seminar on Traffic Engineering*, Feb. 2004.
- [79] N. Johnson, "Modeling walking behavior at the path level," Master's thesis, University of Virginia, 2002.
- [80] A. E. Patla, "Understanding the roles of vision in the control of human locomotion," *Gait & Posture*, vol. 5, pp. 54–69, 1997.
- [81] X. Chu, M. Guttenplan, and M. R. Baltes, "Why people cross where they do : The role of the street environment," National Center for Transit Research - University of South Florida, Tech. Rep. NCTR-473-06, 2002.
- [82] T. F. Novacheck, "The biomechanics of running," *Gait & Posture*, vol. 7, pp. 77–95, 1998.
- [83] R. Vaughan and J. Bain, "Acceleration and speeds of young pedestrians," in *SAE ICE*, 1999.
- [84] —, "Acceleration and speeds of young pedestrians : phase II," in *SAE ICE*, 2000.
- [85] A. Toor, A. Happer, R. Overgaard, and R. Johal, "Real world walking speeds of young pedestrians," in *SAE*, 2001.
- [86] T. Fugger, Jr., B. Randles, A. Stein, W. Whiting, and B. Gallagher, "Analysis of pedestrian gait and perception-reaction at signal-controlled crosswalk intersections," *Transportation Research Record 1705*, pp. 20–25, 2000. [Online]. Available : <http://www.enhancements.org/trb%5C1705-004.pdf>

- [87] D. Helbing, "A mathematical model for the behavior of pedestrians," *Behavioral science*, vol. 36, pp. 298–310, 1991.
- [88] J. P. Granieri, W. Becket, B. D. Reich, J. Crabtree, and N. I. Badler, "Behavioral control for real-time simulated human agents," in *Symposium on Interactive 3D Graphics, Monterey, CA, USA*. Association of Computing Machinery, 1995.
- [89] L. A. Schaefer, G. T. Mackulak, J. K. Cochran, and J. L. Cherilla, "Application of a general particle system model to movement of pedestrians and vehicles," in *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1998.
- [90] V. J. Blue and J. L. Adler, "Cellar automata microsimulation of bi-directionnal pedestrian flows," *Transportation Research Record*, vol. 1678, pp. 135–141, 2000.
- [91] —, "Cellular automata model of emergent collective bi-directional pedestrian dynamics," in *Artificial Life VII, The Seventh International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, Aug. 2000.
- [92] —, "Modeling four-directional pedestrian movements," in *79th Annual meeting of the Transportation Research board*, Jan. 2000.
- [93] —, "Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation," *Transportation Research record*, vol. 1644, pp. 29–36, 1998.
- [94] F. Weifeng, Y. Lizhong, and F. Weicheng, "Simulation of bi-direction pedestrian movement using a cellula automata model," *Physica A. Elsevier*, vol. 321, pp. 663–640, 2003.
- [95] R. Kukla, J. Kerridge, A. Willis, and J. Hine, "Pedflow : Development of an autonomous agent model of pedestrian flow," *Transportation Research Record*, vol. 1774, pp. 11–17, 2002.
- [96] Loria : équipe MAIA Source : <http://www.loria.fr/equipes/maia/>, "Agents," 2003.
- [97] T. Schekhorn, D. O'Sullivan, M. Haklay, and M. Thurstain-Goodwin, "Streets : an agent-based pedestrian model," Center for Advanced Spatial Analysis, UCL, Tech. Rep. 9, Apr. 1999.
- [98] M. Batty, J. DeSyllas, and E. Duxbury, "The discrete dynamics of small-scale events : agent-based models of mobility in carnivals and street parades," Center for Advanced Spatial Analysis, UCL, Tech. Rep. 56, July 2002.
- [99] A. Ebel, D. Hanon, B. Stanciulescu, P. Pudlo, E. Grislin, and F.-X. Lepoutre, "Modèle d'animation comportemental de piétons virtuels," in *Quinzièmes journées de l'Association Francaise d'Informatique Graphique*, Décembre 2002.
- [100] F. Multon, "Contrôle du mouvement des humanoïdes de synthèse," Ph.D. dissertation, Université de Rennes I, 1998.
- [101] M. G. Choi, J. Lee, and S. Y. Shin, "A randomized approach to planning biped locomotion with prescribed motions," Computer Science Department, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Tech. Rep., 2000.
- [102] L. Bezault, R. Boulic, N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann, "An interactive tool for the design of human free-walking trajectories," in *Computer Animation '92, Tokyo*. Springer, 1992, pp. 87–104. [Online]. Available : <http://ligwww.epfl.ch/thalmann/papers.dir/CA92.spline.walk.pdf>

- [103] D. D. Le, R. Boulic, and D. Thalmann, "Integrating age attributes to virtual human locomotion," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, 2003.
- [104] Hella KG Hueck and co. and Ibeo Automobile Sensor Gmbh, "Alasca : Automotive Laser SCanner," 2003.
- [105] K. Fuerstenberg and U. Lages, "Pedestrian Detection and Classification with Laser Scanners," in *9th EAEC International Congress*, June 2003.
- [106] K. Fuerstenberg and V. Wilhoft, "Object tracking and classification using Laser Scanners - pedestrian recognition in urban environment," in *IEEE ITS conference proceedings - Oakland (CA) , USA*, August 25-29 2001.
- [107] E. Walter and L. Pronzato, *Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales*. Masson, 1994, ch. 1, pp. 8–10.
- [108] G. De Nicolao, A. Ferrara, and G. L., "A collision risk assesment approach as a basis for the on-board warning generation in cars'," in *Inteligent Vehicle Symposium*. IEEE, June 2002.
- [109] Projet européen IST, "Preventive safety for un-protected road user," Dec. 2002.
- [110] American Association of State Highway and Transportation Officials, "Manual on uniform traffic control devices," 2001.
- [111] C. Wakim, S. Capperon, and J. Oksman, "A Markovian model of pedestrian behavior," in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, October 10–13 2004, pp. 4028–4033.
- [112] Y. Abramson and B. Steux, "Deliverable 3.3b : "report on inital algorithms"," CAMELLIA : Core for Ambient and Mobile intELLigent Imaging Applications, Tech. Rep., Dec. 2003.
- [113] C. Wakim and S. Capperon, "Procédé et dispositif de prévision de chocs d'un véhicule," Brevet déposé à l'INPI (n°03-15548), 30 décembre 2003.
- [114] C. Wakim, "Procédé et système de prédiction de choc entre un véhicule et un piéton," Brevet déposé à l'INPI (n°05-08631), 19 août 2005.
- [115] R. Vaughan and J. Bain, "Avoiding the emerging pedestrian : a mathematical model," in *SAE*, 1997.
- [116] S. Gaubert, *Systèmes dynamiques à événements discrets : cours DEA ATS*. INRIA, 2003.
- [117] K. Sundaraj, "Détection et traitement de collision en simulation dynamique," Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Juin 2000.
- [118] J. Kuchar and L. Yang, "A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods," *IEEE Transactions on ITS*, vol. 1, no. 4, pp. 179–189, Dec. 2000. [Online]. Available : <http://www.mit.edu/~jkkuchar/ATC-102.pdf>
- [119] K. Blin, M. Akian, F. Bonnans, E. Hoffman, C. Martini, and K. Zeghal, "A stochastic conflict detection model revisited," *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2000.
- [120] R. Lachner, M. Breitner, and H. J. Pesch, "Real-time collision avoidance : differential game, numerical solution and synthesis of strategies," *Annals of the International Society of Dynamic Games*, vol. 5, pp. 115–135, 2000.

- [121] L. Yang, J. H. Yang, E. Feron, and V. Kulkarni, "Development of a performance-based approach for a rear-end collision warning and avoidance system for automobiles," in *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, June 2003.
- [122] A. E. Broadhurst, S. Baker, and T. Kanade, "A prediction and planning framework for road safety analysis, obstacle avoidance and driver information," in *Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems*, Oct. 2004.
- [123] —, "Monte Carlo Road Safety Reasoning," in *IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV2005)*. IEEE, June 2005.
- [124] L. Augusto, "Conception d'un sous-système de prédiction de collisions temps réel embarqué au sein d'un nouveau système de protection des occupants d'un véhicule," Ph.D. dissertation, Ecole Centrale Paris, 29 Novembre 2001.
- [125] Human Solutions Gmbh, "Ramsis software," 2003.
- [126] L. Segel, "Theoretical prediction and experimental substantiation of the response of the automobile to steering control," in *Proceedings of the Automobile Division*, T. I. of Mechanical Engineers, Ed., London, 1956.
- [127] M. Martin, "Le mouvement de lacet du véhicule lors d'une prise de virage," Educauto, Tech. Rep., 2003. [Online]. Available : <http://www.educauto.org/Documents/Infotech/LacetEnVirage.pdf>
- [128] E. A. Johnson, L. A. Bergman, and J. Spencer, B. F., "Intelligent monte carlo simulation and discrepancy sensitivity," in *Computational Stochastic Mechanics, Balkema, Rotterdam*, P. D. Spanos, Ed., 1999, pp. 31–39.
- [129] T. Liu, P. Bahl, and I. Chlamtac, "Mobility modeling, location tracking, and trajectory prediction in wireless atm networks," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 16, no. 6, pp. 922–936, Aug. 1998.
- [130] C. Wakim and S. Capperon, "Système et procédé de commande automatique de positionnement d'un élément de détection de l'environnement, embarqué à bord d'un véhicule automobile," Brevet déposé à l'INPI (n°FR 04-07437), juillet 2004.
- [131] Y. Abramson, "Systèmes d'aide à la conduite basés sur la vision : de la théorie aux applications," Thèse de doctorat, École des Mines de Paris, France, 2005.
- [132] P. Menold, R. Pearson, and F. Allgöwer, "Online outlier detection and removal," in *Proceedings of the 7th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED99)*, Haifa, Israel, June 28-30 1999, pp. 1110–1133.
- [133] G. Fleury, *Décision : Détection - Estimation*. Supélec, 1998.
- [134] D. Cambon de Lavalette, A. Tursz, and D. Dechaud Rayssiguier, *Les accidents de piétons dans l'enfance*. INRETS, Centre de l'Enfance, Doin, 1989.
- [135] Préfecture de Police, Mairie de Paris, "Semaine nationale de sécurité sur la route à Paris," Paris, France, décembre 2002.
- [136] H. van der Molen, *Human factors for Highway Engineers*. Pergamon Elsevier, 2002, ch. Young pedestrians and young cyclists, pp. 217–240.

- [137] M. Baltes, “A study of fatal pedestrian crashes in Florida,” University of South Florida, Tech. Rep., 1995. [Online]. Available : http://safety.fhwa.dot.gov/ped_bike/docs/00861.pdf
- [138] Bibliomed, “Accidents de roller et de trottinette,” *Bibliomed*, no. 232, 5 juillet 2001. [Online]. Available : <http://www.paris-nord-sftg.com/rev.pres.trotinette.roller.accidents.0107.htm>
- [139] B. Thélot, M. Nectoux, and H. Isnard, “Épidémiologie des accidents de roller en France (de 1997 à 1999),” *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, vol. 13, pp. 57–59, 2001. [Online]. Available : <http://www.invs.sante.fr/beh/2001/13/index.htm>
- [140] M. Davis, “Piecewise deterministic Markov processes : a general class of nondiffusion stochastic models,” *Journal of Royal Statist. Soc. series B*, vol. 46, pp. 353–388, 1984.
- [141] R. Veyseyre, *Statistique et probabilités pour l'ingénieur*. Dunod, 2001, ch. 1.2 Séries numériques à une dimension, pp. 11–13.
- [142] H. Sturges, “The choice of a class-interval,” *J. American Statistical Association*, vol. 21, pp. 65–66, 1926.
- [143] R. J. Hyndman, “The problem with Sturges’ rule for constructing histograms,” July 1995.
- [144] A. Bowman and A. Azzalini, *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis : The Kernel Approach with S-Plus Illustrations*. Oxford University Press, 1997.
- [145] Wikipedia, “Outlier,” June 2005. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Outlier>
- [146] E.W. Weisstein et al., “Outlier.” [Online]. Available : <http://mathworld.wolfram.com/Outlier.html>
- [147] D. S. Moore and G. P. McCabe, *Introduction to the Practice of Statistics*, 3rd ed. New York : W. H. Freeman, 1999.
- [148] Wikipedia, “Levy skew alpha-stable distribution,” Sept. 2005. [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Levy_alpha-stable_distributions
- [149] NationMaster.com, “Encyclopedia : Cauchy distribution,” Sept. 2005. [Online]. Available : <http://www.nationmaster.com/encyclopedia/Cauchy-distribution>

Résumé

Cette thèse CIFRE s'intéresse à la « prédiction de chocs véhicule-piéton » au sein d'un dispositif de protection des piétons, de type pré-crash.

Les accidents véhicule-piéton ont d'abord été étudiés, afin de disposer d'une base de référence pour l'évaluation, grâce aux simulations, de systèmes intelligents de protection des piétons. Le comportement des piétons a ensuite été étudié, et un modèle statistique, à temps continu, reposant sur quatre états discrets, a été proposé et évalué. Ce modèle de piétons a été utilisé pour réaliser une prédiction probabiliste des chocs véhicule-piéton. Cette prédiction est réalisée grâce à des simulations de type Monte Carlo. Pour en améliorer l'efficacité, des méthodes de réduction de variance, de type « splitting » et « roulette russe » ont été évaluées. Enfin, diverses hypothèses sur la qualité des mesures, réalisées par le futur dispositif de « détection de piétons et d'estimation de leurs positions et vitesses relatives », qui sont les entrées du module de prédiction de chocs, ont été évaluées, afin de spécifier le besoin sur un tel dispositif.

Ce travail a fait l'objet de trois articles publiés et de cinq brevets.

Mots-clés : Pré-crash - Piéton - Prédiction - Modélisation - Simulation - Monte Carlo

Abstract

This PhD thesis treats the “prediction of vehicle-to-pedestrian accidents” as part of a pedestrian precrash protection system.

The study began with a thorough evaluation of these accidents. The data obtained from this work were then used to generate reference cases that allow the evaluation of intelligent pedestrian protection systems based on simulations. In the next step, the behavior of pedestrians was studied and a continuous-time statistical model, based on four discrete states, was proposed and evaluated. This pedestrian model makes possible a probabilistic prediction of vehicle-to-pedestrian accidents, for which Monte Carlo simulations were used. Variance reduction methods such as “splitting” and “Russian roulette” were used to improve the algorithms' performance. Finally, several hypotheses were proposed with aim of modeling the uncertainties involved in detecting pedestrians and estimating their relative positions and speeds system. Evaluating different types of uncertainties on these measurements, which are the inputs of the prediction module, contributes to the specification of a system that detects pedestrians and estimates their positions and speeds.

This work led to three published articles and five patent applications.

Keywords: Precrash, Pedestrian, Prediction, Modeling, Simulation, Monte Carlo